

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Valtteri Mattsson

## MITTAUSEPÄVARMUUDEN MÄÄRITTÄMINEN TAAJUUSMUUTTA- JAN LÄMPENEMÄTESTISSÄ

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 28.11.2008

Työn valvoja:

Prof. Jorma Kyyrä

Työn ohjaaja:

DI Jari Yli-Juuti

|  |              |                  |
|--|--------------|------------------|
| Tekijä: Valtteri Mattsson  |              |                  |
| Työn nimi: Mittausepävarmuuden määrittäminen taajuusmuuttajan lämpenemätestissä  |              |                  |
| Päivämäärä: 28.11.2008   | Kieli: Suomi | Sivumäärä: 10+90 |
| Tiedekunta: Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta   |              |                  |
| Professuuri: Tehoelektroniikka ja sähkökäytöt  |              | Koodi: S-81      |
| Valvoja: Prof. Jorma Kyyrä   |              |                  |
| Ohjaaja: DI Jari Yli-Juuti   |              |                  |
| <p>Työssä määritetään mittausepävarmuus taajuusmuuttajan lämpenemätestin lämpötilanmittauksessa. Syöttöverkon parametrien muuttumisen vaikutusta lämpenemätestituloksiin käsitellään testatun taajuusmuuttajan tuloksia analysoimalla.</p> <p>Termoparimittauksissa mittalaitteen ja termoparilangan aiheuttamat epävarmuuskomponentit saadaan ratkaistua valmistajien määrittämien ominaisuuksien perusteella. Käytettävä termoparianturin pintakiinnitys aiheuttaa hankalammin määriteltävän virhelähteen. Huonolla kiinnityksellä aiheutetaan lämpötilagradientti mitattavan pinnan ja anturin välille, jolloin mitattu lämpötila poikkeaa systemaattisesti mitattavan pinnan lämpötilasta. Ongelma korostuu, kun mitattava pinta on pakotetun ilmankierron piirissä, jolloin lämpötilaero anturin ja todellisen mittauskohteen välillä kasvaa.</p> <p>Sähköisten parametrien muutokset syöttöverkossa muuttavat taajuusmuuttajan toimintapistettä, jolloin myös saatavat lämpötilanmittaustulokset muuttuvat. Yksittäiset testit voidaan suorittaa ongelmitta, koska taajuusmuuttaja on suunniteltu toimimaan myös ideaalisesta poikkeavissa verkko-olosuhteissa. Kun vaaditaan peräkkäisiä testejä, joissa syöttöverkon ominaisuudet pysyvät vakioina, täytyy syöttöjännite tuottaa hallitusti, kuten esimerkiksi generaattorilla.</p> <p>Saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että kaikki testatut syöttöverkon ominaisuudet sekä lämpötilanmittauksen epäideaalisuudet vaikuttavat selkeästi saataviin tuloksiin. Tällöin kaikki työssä esitellyt parametrit täytyy tuntea, jotta testi pystytään toistamaan samoissa olosuhteissa.</p> |              |                  |
| Avainsanat: Mittausepävarmuus, harmoniset yliaallot, taajuusmuuttaja, lämpenemätesti   |              |                  |

Author: Valtteri Mattsson

Title: Definition of Measurement Uncertainty in Temperature-Rise Tests of Frequency Converters

Date: 28.11.2008

Language: Finnish

Number of pages: 10+90

Faculty: Faculty of Electronics, Communications and Automation

Professorship: Power Electronics and Electric Drives

Code: S-81

Supervisor: Prof. Jorma Kyyrä

Instructor: M.Sc.(Tech.) Jari Yli-Juuti

This thesis concentrates in defining measurement uncertainty in temperature measurements of frequency converters. The influence of changes in supply network parameters is covered by analyzing the test results of the temperature-rise tests.

The measuring equipment and thermocouple wire errors can be solved by using manufacturers' data sheet information. The surface mounting generates a error source that is more complex to analyze. Bad thermal connection produces thermal gradient between the surface and the probe, which leads to systematic error in measurement. The problem is larger when measuring forcedly convected surfaces.

The changes in the supplying network alter the operating point of the frequency converter which affects the temperature rise test results. When performing single tests there won't be a problem, since the converter is designed to work in specified limits independent from supply parameters. When sequential tests are to be performed and the supply parameters are to be kept constant a regulated supply, i.e. a generator, must be used.

According to the test results all tested supply network parameters and nonidealities in temperature measurement affect clearly to the test results. All discussed parameters must be known if a test is to be repeated under the same conditions.

Keywords: Measurement uncertainty, harmonics, frequency converter, temperature-rise test

## Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty ABB Drives Oy:n Teknologia-osastolla. Kiitän työni valvojaa professori Jorma Kyyrää sekä ohjaajaani DI Jari Yli-Juutia saamastani tuesta ja ohjauksesta diplomityöni aikana.

Haluan kiittää myös kaikkia työtovereitani ja muita, jotka ovat minua työssäni auttaneet. Erityiskiitokset kuuluvat niille henkilöille, jotka ovat avustaneet minua tarvitsemieni mittausjärjestelyiden rakentamisessa.

Vanhempiani haluan kiittää saamastani tuesta diplomityöni ja koko opiskeluni ajalta.

Otaniemi, 28.11.2008

Valtteri Mattsson

# Sisältö

|   |            |
|---|------------|
| <b>Tiivistelmä</b>                                  | <b>ii</b>  |
| <b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>                    | <b>iii</b> |
| <b>Esipuhe</b>                                      | <b>iv</b>  |
| <b>Sisällysluettelo</b>                             | <b>v</b>   |
| <b>Symbolit ja lyhenteet</b>                        | <b>vii</b> |
| <b>1 Johdanto</b>                                   | <b>1</b>   |
| <b>2 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate</b>          | <b>3</b>   |
| 2.1 Tasasuuntaaja . . . . .                         | 3          |
| 2.2 Vaihtosuuntaaja . . . . .                       | 5          |
| <b>3 Syöttöverkon ominaisuudet</b>                  | <b>8</b>   |
| 3.1 Kolmivaiheverkko . . . . .                      | 8          |
| 3.2 Harmoniset yliaallot . . . . .                  | 9          |
| 3.3 Verkon jännitteiden epäsymmetrisyys . . . . .   | 14         |
| 3.4 Verkon ominaisarvot . . . . .                   | 15         |
| <b>4 Taajuusmuuttajan häviölähteiden analyysi</b>   | <b>17</b>  |
| 4.1 Induktiiviset komponentit . . . . .             | 17         |
| 4.2 Tasajännitekondensaattorit . . . . .            | 17         |
| 4.3 Diodit . . . . .                                | 18         |
| 4.4 IGBT . . . . .                                  | 19         |
| <b>5 Lämpötilamittauksen toteutus</b>               | <b>23</b>  |
| 5.1 Erilaisia lämpötilanmittausmenetelmiä . . . . . | 23         |
| 5.1.1 Nestepatsaslämpömittarit . . . . .            | 23         |
| 5.1.2 Bimetallilämpömittarit . . . . .              | 23         |
| 5.1.3 Metallivastuslämpömittarit . . . . .          | 24         |
| 5.1.4 Termistorit . . . . .                         | 24         |
| 5.1.5 Optiset mittarit . . . . .                    | 25         |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 5.1.6    | Puolijohdelämpömittarit . . . . .  | 26        |
| 5.2      | Termopari lämpötilanmittausmenetelmänä . . . . .   | 26        |
| 5.2.1    | Termoparimittauksen toimintaperiaate . . . . .   | 26        |
| 5.2.2    | Erilaisia termoparityyppejä . . . . .  | 29        |
| 5.2.3    | Jännitemittauksen muunnos lämpötilaksi . . . . .   | 30        |
| 5.3      | Lämpenemä ja sen laskeminen . . . . .  | 32        |
| <b>6</b> | <b>Lämpötilanmittauksen mittausepävarmuuden määrittäminen</b>                                | <b>36</b> |
| 6.1      | Teoreettinen tapa mittausepävarmuuden määrittämiseksi . . . . .                              | 36        |
| 6.2      | Testilaitteiston lämpötilan mittausepävarmuuden määrittäminen . . .                          | 38        |
| 6.2.1    | Termoparin tarkkuus . . . . .  | 39        |
| 6.2.2    | Mittalaitteen tarkkuus . . . . .   | 39        |
| 6.2.3    | Termoparin kiinnityksen tarkkuus . . . . .   | 39        |
| 6.2.4    | Muita epävarmuustekijöitä . . . . .  | 44        |
| 6.2.5    | Tulokset . . . . .   | 44        |
| <b>7</b> | <b>Erilaisten verkko-olosuhteiden vaikutus laitteen häviöihin ja sisäisiin lämpötiloihin</b> | <b>46</b> |
| 7.1      | Testausjärjestelyt . . . . .   | 46        |
| 7.2      | Verkon jännitteen vaikutus . . . . .   | 48        |
| 7.3      | Verkon yliaaltojen vaikutus . . . . .  | 52        |
| 7.4      | Verkon epäsymmetrisyyden vaikutus . . . . .  | 55        |
| 7.5      | Verkon ja testattavan laitteen oikosulkusuhteen vaikutus . . . . .                           | 56        |
| <b>8</b> | <b>Tulosten tarkastelu</b>   | <b>60</b> |
| 8.1      | Lämpötilanmittauksen epävarmuudet . . . . .  | 60        |
| 8.2      | Syöttöverkosta aiheutuvat epävarmuudet . . . . .   | 61        |
| <b>9</b> | <b>Yhteenveto</b>  | <b>63</b> |
|          | <b>Viitteet</b>  | <b>65</b> |
|          | <b>Liite A: Lämpenemätestien selitykset</b>  | <b>67</b> |
|          | <b>Liite B: Mittaustulokset</b>  | <b>70</b> |
|          | <b>Liite C: Tekniset ohjelehdet</b>  | <b>79</b> |

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

|                |   |
|----------------|---|
| $\alpha$       | resistanssin lämpötilakerroin                               |
| $\beta$        | termistorin valmistusprosessista riippuva kerroin           |
| $C$            | kondensaattorin kapasitanssi                                |
| $C_{th}$       | kappaleen lämpökapasiteetti                                 |
| $\delta$       | muuttuva pulssisuhde  |
| $e_{AB}$       | Seebeckin jännite   |
| $f_s$          | kytkentätaajuus   |
| $\varphi$      | jännitteen ja virran välinen vaihekulma                     |
| $\varphi_{ab}$ | vaiheiden a ja b välille kytketyn kuorman virran vaihekulma |
| $\varphi_{bc}$ | vaiheiden b ja c välille kytketyn kuorman virran vaihekulma |
| $\varphi_{ca}$ | vaiheiden c ja a välille kytketyn kuorman virran vaihekulma |
| $I$            | vaihevirta  |
| $I_{ab}$       | vaiheiden a ja b välille kytketyn kuorman virta             |
| $I_{avg}$      | virran aritmeettinen keskiarvo                              |
| $I_{bc}$       | vaiheiden b ja c välille kytketyn kuorman virta             |
| $I_{1N}$       | muuntajan ensiövirta  |
| $I_{2N}$       | muuntajan toisiövirta                                       |
| $I_{ca}$       | vaiheiden c ja a välille kytketyn kuorman virta             |
| $I_{IGBT,nim}$ | IGBT:n virran nimellisarvo                                  |
| $I_d$          | tasajännitevälipiirin virta                                 |
| $i_C$          | kondensaattorin virta                                       |
| $i_{C(n)}$     | kondensaattorin virran taajuuskomponentti                   |
| $I_{IGBT,max}$ | IGBT:n virran huippuarvo                                    |
| $i_{(n)}$      | yliaaltovirtakomponentti                                    |
| $I_{neg}$      | negatiivinen sekvenssivirta                                 |
| $I_{s1}$       | perustaaajuinen vaihevirta                                  |
| $I_{sc}$       | kolmivaiheinen oikosulkuvirta pisteessä IPC                 |
| $I_{sh}$       | harmoninen vaihevirtakomponentti                            |
| $i(t)$         | virta ajan funktiona  |
| $i_n(t)$       | virran taajuuskomponentti ajan funktiona                    |
| $I_{C,RMS}$    | kondensaattorin virran RMS-arvo                             |
| $I_{RRM}$      | diodin takavirran huippuarvo                                |
| $I_{THD}$      | virran THD  |
| $\lambda$      | kokonaistehokerroin   |
| $L_{AC}$       | syöttöpuolen induktanssi                                    |
| $L_C$          | kondensaattorin hajainduktanssi                             |
| $L_{DC}$       | tasajännitevälipiirin induktanssi                           |
| $m_a$          | amplitudimodulaatiokerroin                                  |
| $\omega$       | syöttöverkon kulmataajuus                                   |
| $p(t)$         | teho ajan funktiona ideaalitapauksessa                      |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $P$             | pätöteho  |
| $P_d$           | häviöteho   |
| $P_{diodi}$     | vaihtosuuntaajan rinnankytketyn diodin johtohäviö   |
| $P_{dis}$       | kondensaattorin häviöteho                           |
| $P_{IGBT}$      | IGBT:n johtohäviöteho                               |
| $P_{on}$        | IGBT:n johtohäviö yleisesti                         |
| $P_s$           | kytkentä- ja katkaisuhäviöihin kuluva teho          |
| $P_{sw,on}$     | IGBT:n kytkentähäviöteho                            |
| $P_{sw,off}$    | IGBT:n katkaisuhäviöteho                            |
| $\bar{q}$       | toistokokeen keskiarvo                              |
| $Q_1$           | perustaaajuinen loisteho                            |
| $Q_h$           | ylialto- eli säröteho                               |
| $Q_{rr}$        | diodin takavirrasta aiheutuva varaus                |
| $R_{ESR}$       | kondensaattorin sisäinen resistanssi                |
| $r_k$           | muuntajan nimellisresistanssi suhteellisarvona      |
| $R_k$           | muuntajan oikosulkuresistanssi                      |
| $R_0$           | metallivastuksen resistanssi referenssilämpötilassa |
| $R_{on}$        | diodin/IGBT:n johtotilan resistanssi                |
| $R_{sce}$       | syöttöverkon ja testattavan laitteen oikosulkusuhde |
| $R_{th}$        | lämpöresistanssi                                    |
| $R_T$           | termistorin resistanssi                             |
| $R_{(T)}$       | metallivastuslämpömittarin resistanssi              |
| $S$             | näennäisteho  |
| $S_1$           | perustaaajuinen näennäisteho                        |
| $S_{equ}$       | testattavan laitteen nimellisteho                   |
| $S_{sc}$        | syöttöverkon oikosulkuteho                          |
| $T$             | lämpötila   |
| $\tau$          | lämpenemän aikavakio                                |
| $T_0$           | referenssilämpötila                                 |
| $t_{on}$        | IGBT:n johtoaika                                    |
| $t_{rr}$        | diodin takavirran kesto aika                        |
| $T_S$           | kytkentäjakson aika                                 |
| $t_{sw,off}$    | IGBT:n katkaisuaika                                 |
| $t_{sw,on}$     | IGBT:n kytkentäaika                                 |
| $\theta$        | lämpenemä   |
| $\theta_\infty$ | loppulämpenemä                                      |
| $\theta_0$      | alkulämpenemä                                       |
| $\Theta$        | loppulämpötila                                      |
| $\Theta_0$      | alkulämpötila                                       |
| $U$             | vaihejännite  |
| $U_1$           | taajuusmuuttajan lähtöjännite                       |
| $U_{1N}$        | muuntajan ensiöjännite                              |
| $U_{2N}$        | muuntajan toisiojännite                             |
| $U_C$           | kondensaattorin jännite                             |



|                       |  |
|-----------------------|--|
| $\underline{U}_{C,n}$ | kondensaattorin jännitteen taajuuskomponentti          |
| $U_h$                 | yliaaltojännitekomponentti                             |
| $U_{(n)}$             | yliaaltojännitekomponentti                             |
| $U_{neg}$             | negatiivisen sekvenssin jännite                        |
| $U_{nominal}$         | syöttöverkon nimellisjännite                           |
| $\Delta U_d$          | kommutoinnista aiheutuva tasajännitteenalenema         |
| $\hat{u}_\Delta$      | kolmiomuotoinen jännitteen vertailuarvo                |
| $U_{pos}$             | positiivisen sekvenssin eli symmetrisen verkon jännite |
| $u(\bar{q})$          | toistokokeen standardimittausepävarmuus                |
| $\hat{u}_{ref}$       | sinimuotoinen jännitteen vertailuarvo                  |
| $u(t)$                | jännite ajan funktiona ideaalitapauksessa              |
| $U_{THD}$             | jännitteen THD   |
| $V_0$                 | IGBT:n jännite   |
| $v_d$                 | tasajännitteen hetkellisarvo                           |
| $V_d$                 | tasajännite  |
| $V_{d0}$              | tasajännitteen keskiarvo                               |
| $V_{diodi,on}$        | vaihtosuuntaajan diodin johtotilan jännite             |
| $V_{IGBT,on}$         | IGBT:n johtotilan jännite                              |
| $V_j$                 | diodin liitosjännite                                   |
| $V_{LL}$              | kolmivaiheinen pääjännite                              |
| $V_{on}$              | diodin päästöjännite                                   |
| $W_{on}$              | IGBT:n johtohäviöenergia                               |
| $W_{sw,on}$           | IGBT:n kytkentähäviöenergia                            |
| $W_{sw,off}$          | IGBT:n katkaisuhäviöenergia                            |
| $x_k$                 | muuntajan nimellisreaktanssi suhteellisarvona          |
| $X_k$                 | muuntajan oikosulkureaktanssi                          |
| $X_n$                 | syöttöverkon nimellisreaktanssi                        |
| $X_v$                 | syöttöverkon reaktanssi                                |
| $Z_{1N}$              | muuntajan ensiön nimellisimpedanssi                    |
| $Z_{2N}$              | muuntajan toision nimellisimpedanssi                   |
| $z_k$                 | muuntajan oikosulkuimpedanssi suhteellisarvona         |
| $Z_k$                 | muuntajan oikosulkuimpedanssi                          |
| $Z$                   | verkon impedanssi pisteessä PCC                        |
| $Z_{N(n)}$            | verkon impedanssi taajuudelle n                        |

## Operaattorit

|           |                                     |
|-----------|-------------------------------------|
| $dt$      | differentiaalinen aikaväli          |
| $d\theta$ | lämpenemän differentiaalinen muutos |

## Lyhenteet

|      |  |
|------|--|
| AC   | vaihtosähkö                                    |
| ASTM | American Society for Testing and Materials     |
| DC   | tasasähkö                                      |
| DTC  | Direct Torque Control                          |
| EA   | European co-operation for Accreditation        |
| ESR  | Effective Series Resistance                    |
| IEC  | International Electrotechnical Commission      |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor              |
| IPC  | In-plant Point of Coupling                     |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| PCC  | Point of Common Coupling                       |
| RMS  | Root Mean Square                               |
| THD  | Total Harmonic Distortion                      |

# 1 Johdanto

Taajuusmuuttaja on laite, joka muuttaa siihen syötettävän vaihtosähkön taajuuden ja amplitudin halutun muotoiseksi vaihtosähköksi. Taajuusmuuttajan pääasiallinen käyttötarkoitus on syöttää vaihtosähkömoottoria, jolloin moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia voidaan muuttaa portaattomasti.

Taajuusmuuttajia valmistettaessa uuden tuotteen tuotekehitykseen kuuluu olennaisena osana laitteen sisäisten lämpötilojen tunteminen erilaisissa käyttötilanteissa. Halutun lämpötilakäyttäytymisen varmistamiseksi taajuusmuuttajalle tehdään lämpenemätestiohjelma, jossa varmistetaan kaikkien olennaisten komponenttien toiminta kaikissa käyttöolosuhteissa halutulla lämpötila-alueella. Lämpötilanmittaukset toteutetaan laitteen komponentteihin asennettavilla lämpötila-antureilla, ja anturien mitaamat lämpötilat luetaan mittalaitteella.

Koska mikään käytännön olosuhteissa tehtävä mittausta ei ole täysin tarkka, täytyy mittauksen mittausepävarmuus tuntea, jotta mittaustuloksista voidaan tehdä oikeita johtopäätöksiä tuotekehityksen tueksi. Tässä työssä lämpötilamittaukset on tehty termoparimenetelmällä. Menetelmä perustuu kahden erilaisen metallin liitoksessa muodostuvan termojännitteen mittaamiseen. Tälle mittaustapahtumalle on työssä määritetty mittausepävarmuus.

Työssä käsitellään myös erilaisten syöttöverkon ominaisuuksien vaikutusta taajuusmuuttajan lämpötilanmittauksista saataviin tuloksiin. Kun lämpötilan mittausepävarmuus on määritetty, tiedetään millä tarkkuudella saatuihin tuloksiin voidaan luottaa. Seuraava kysymys on, millaisessa syöttöverkossa mittaukset tulisi suorittaa. Laitteita suunnitellaan käytettäväksi syöttöverkoissa, jotka eivät ole ideaalisia. Näin myös testausten tulisi varmistaa laitteen toiminta epäideaalisissa olosuhteissa.

Luvussa kaksi käsitellään tasajännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan rakennetta ja toimintaperiaatetta. Kolmannessa luvussa käydään läpi kolmivaiheverkon ja harmonisten yliaaltojen teoriaa. Neljännessä luvussa kuvaillaan taajuusmuuttajan erilaisten pääpiirikomponenttien perusyhtälöt. Viides luku esittelee erilaisia lämpötilanmittausmenetelmiä. Termoparin toimintaperiaate ja käytännön mittalaitten toimintaa käsitellään omana laajempana kokonaisuutenaan luvussa 5.2.

Kuudennessa luvussa määritetään lämpötilanmittausten mittausepävarmuus. Kokeellisena tuloksena esitellään, miten paljon mittaustarkkuus vaihtelee kun käytetään erilaisia termoparin valmistus- ja kiinnitystapoja käytettävän mittalaitteen pyssyessä samana. Seitsemännessä luvussa käsitellään syöttöverkon jännitteen, harmonisten yliaaltojen, epäsymmetrisyyden sekä oikosulkutehon vaikutusta testikokoonpanon pääpiirikomponenttien lämpenemisiin.

Kahdeksannessa luvussa esitellään työn tärkeimmät tulokset sekä asioita, joihin ei tässä työssä perehdytty. Luvussa määritetään asioita, joita kannattaa jatkossa tutkia. Viimeisessä yhdeksännessä luvussa kuvaillaan työtä kokonaisuutena sekä arvioidaan työn tulosten merkitystä käytännön mittausten epävarmuustekijöiden määrittämisessä ja mittausten kehittämisessä.

Osa mittaustuloksista jäi työn varsinaisen laajuuden ulkopuolelle. Liite A sisältää lämpenemätestien selitykset sekä yksityiskohtaiset tiedot anturikiinnityksistä. Liite B sisältää täydelliset mittaustulokset kaikista tehdyistä mittauksista. Liite C sisältää teknisiä ohjelehtiä käytetystä taajuusmuuttajasta sekä lämpötilanmittauslaitteistosta.

## 2 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate

Taajuusmuuttaja muuttaa vaihtosähkön taajuuden ja amplitudin halutuksi. Työssä käsitellään tasajännitevälipiirillistä muuttajaa, jossa syöttävä vaihtojännite muunnetaan ensin tasajännitteeksi ja vaihtosuunnataan halutunlaiseksi lähtöjännitteeksi. Tasasuuntaus voidaan toteuttaa passiivisella verkkokommutoivalla tai aktiivisella itsekommutoivalla tasasuuntaajalla, joista tässä työssä keskitytään verkkokommutoivaan suuntaajaan. Vaihtosuuntaus toteutetaan aktiivisella itsekommutoivalla silta-tyrkennällä.

Taajuusmuuttajia käytetään, kun tarvitaan muuttuvanopeuksinen vaihtosähkömoottorikäyttö. Taajuusmuuttajan etuja myös tarkka momentin säätö sekä energiatehokkuus. Uusimpia taajuusmuuttajien sovelluskohteita ovat uusiutuvat energialähteet kuten tuulivoima ja aurinkovoima. Normaalisti taajuusmuuttaja kuormittaa syöttöverkkoa ja syöttää tehoa sähkömoottorin akselille. Tuulivoimassa sähkömoottori korvataan generaattorilla, ja taajuusmuuttajan läpi virtaavan tehon suunta vaihtuu käänteiseksi. Passiivinen verkkokommutoiva tasasuuntaaja korvataan aktiivisella verkkosuuntaajalla, jolla tasajännitevälipiirin energia muunnetaan syöttöverkkoon syötettäväksi vaihtosähköksi.

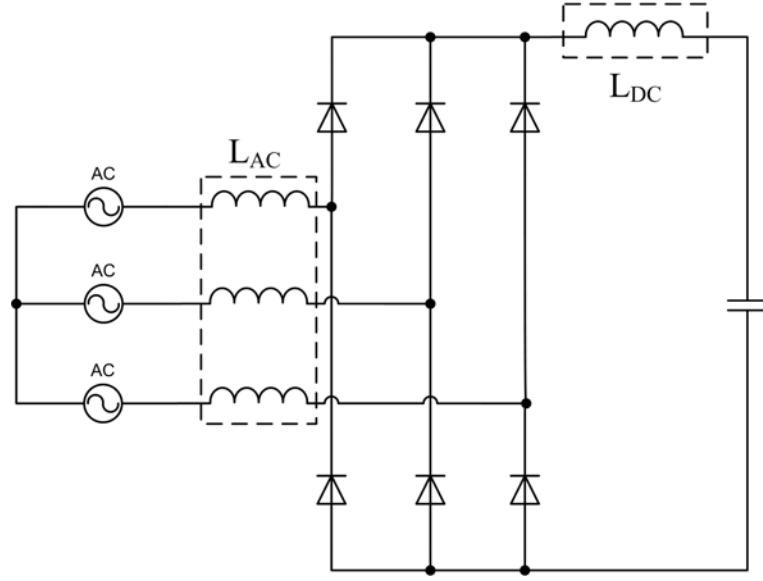
### 2.1 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajan tarkoitus on muuntaa laitetta syöttävä vaihtojännite tasajännitteeksi. Normaalisti syöttöjännitteen taajuus on joko 50 Hz tai 60 Hz. Euroopassa sähköverkko on 50 hertsin taajuinen. Yksinkertainen tasasuuntaaja muodostuu, kun puolijohdekytkiminä käytetään diodeja ja tälle suuntaajatyypille on ominaista säätämättömän tasajännitteen tuottaminen. Myös tehon virtaussuunta on aina verkosta välipiiriin päin, eikä tehoa voida syöttää takaisin verkkoon.

Ideaalinen tasasuuntaaja tuottaa täydellisen sykkeetöntä tasajännitettä. Todellisuudessa tämä ei toteudu, ja tasajännitettä tasataan tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan väliin sijoitettavalla tasajännitevälipiirin kondensaattorilla. Dioditasasuuntaaja ottaa syöttöverkosta tyypillisesti ei-sinimuotoisen virran, joka aukottuu pienillä virroilla. Käytännössä tasasuuntauspiiriin lisätään induktanssia joko syöttöpuolelle tai tasajännitepuolelle, jolloin virran muutosnopeus rajoittuu ja virran käyrämuoto muuttuu lähemmäksi ideaalista siniaaltoja. Kuvasta 1 nähdään esimerkit ylimääräisten induktanssien eli kuristinten sijoituksesta pääpiiriin. Tässä työssä mittaukset on tehty laitteella, jonka pääpiirissä ei ole kuristinta. Tällöin verkon muutosilmiöt näkyvät suoraan muissa käsiteltävissä komponenteissa kuten tasasuuntaussillassa.

Tässä työssä keskitytään teollisuudessa hyvin yleiseen kolmivaiheiseen dioditasasuuntaajaan. Tasasuuntaaja on kuusipulssinen kokosiltatasasuuntaaja. Kuvassa 1 on esitelty kuusipulssitasasuuntaajan rakenne. Yhtälöt (1) ja (2) pätevät tapauksessa, jossa vaihtosähköpuolen induktanssit  $L_{AC}$  ovat pienet ja välipiirin induktanssi  $L_{DC}$  ääretön. Diodien johtoajat samassa tilanteessa esitellään kuvassa 2, jossa virta siirtyy diodilta toiselle ilman kommutointiviivettä. Kuvasta nähdään, että yhden

diodin johtojakson aikana tasajännitteessä on kaksi huippua.



Kuva 1: Ideaalinen kuusipulssidioditasasuuntaaja

Määritetään tasajännitteen keskiarvo  $V_{d0}$  kuvan 2 tapauksessa. Virtojen ja jännitteiden symmetrisyyden perusteella riittää, kun käsitellään yhtä kuudesta johtoajasta. Integroimalla tasajännitteen hetkellisarvoa  $v_d$  osajakson yli saadaan keskiarvo ratkaistua, kun tunnetaan tasasuuntaajaa syöttävä kolmivaiheinen pääjännite  $V_{LL}$ . [13]

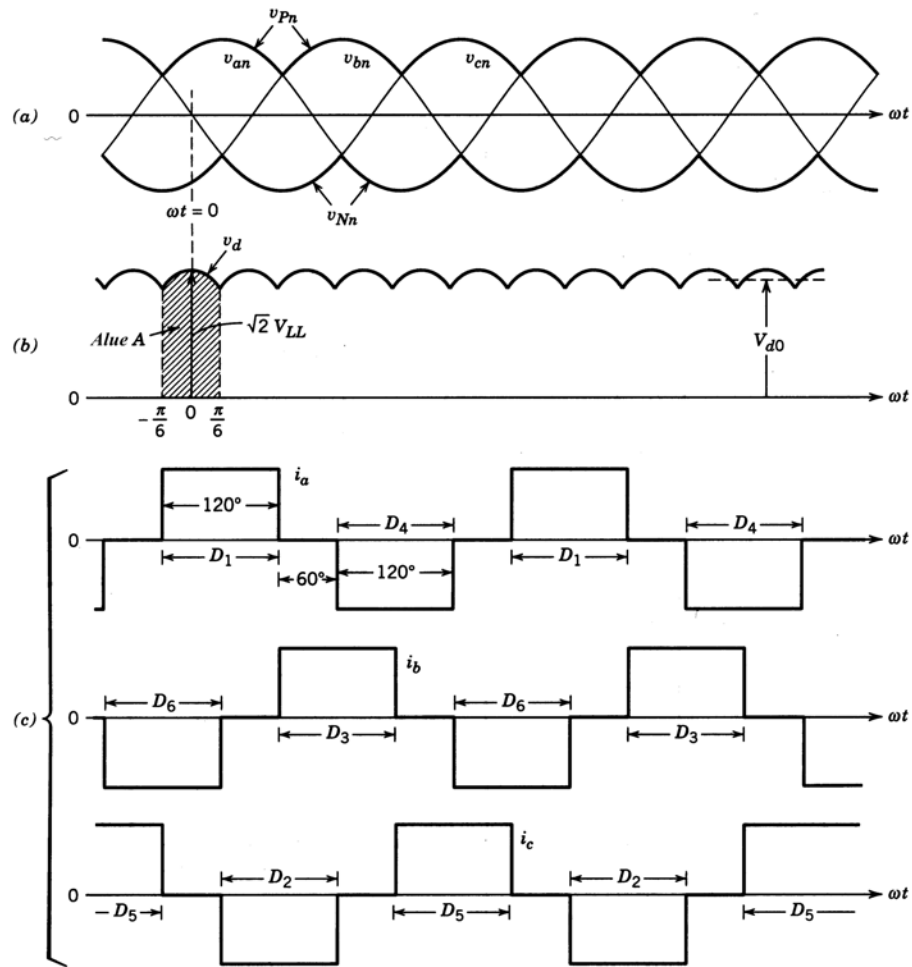
$$v_d = a_{ab} = \sqrt{2}V_{LL}\cos(\omega t) \quad -\frac{1}{6}\pi < \omega t < \frac{1}{6}\pi \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_{d0} &= \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}V_{LL}\cos(\omega t)d(\omega t) = \frac{3}{\pi}\sqrt{2}V_{LL} \\ &\approx 1,35V_{LL} \end{aligned} \quad (2)$$

Dioditasasuuntaaja on verkkokommutoiva, eli sen puolijohteiden johtoajat määräytyvät syöttöverkon jännitteistä. Tasasuuntaajalle on tyypillistä kommutoinnista aiheutuva tasajännitteenalenema  $\Delta U_d$  välipiirin tasavirran  $I_d$  kasvaessa.

$$\Delta U_d = \frac{3}{\pi}X_v I_d \quad (3)$$

Tasajännitteenalenema on verrannollinen myös syöttöverkon reaktanssiin  $X_v = \omega L_{AC}$ . [11]



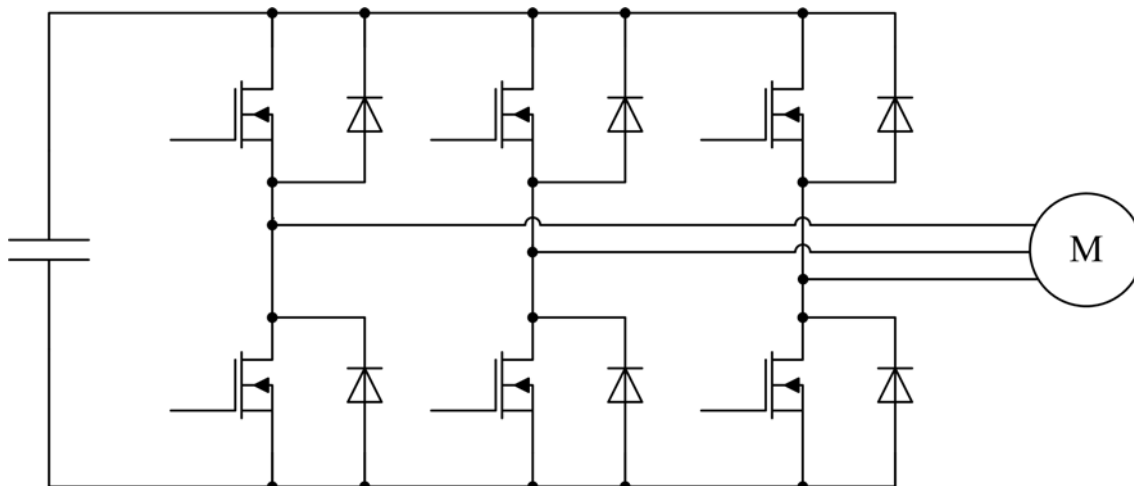
Kuva 2: Diodien johtoajat pienellä syöttöverkon induktanssilla  $L_{AC}$  ja äärettömällä välipiirin induktanssilla  $L_{DC}$  [13]

## 2.2 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajan tarkoitus on muodostaa välipiirin tasajännitteestä halutun muotoinen ja taajuinen vaihtojännite. Vaihtosuuntaaja toimii normaalisti siten, että teho virtaa tasajännitevälipiiristä moottorille päin. Vaihtosuuntaajan rakenne sallii myös käänteisen toiminnan eli moottorijarrutuksen, jossa moottorilta siirtyy energiaa tasajännitevälipiiriin. Energian syöttäminen takaisin syöttöverkkoon vaatisi aktiivisen verkkosuuntaajan, johon ei tässä työssä tarkemmin perehdytä. Yleinen tapa satunnaiseen jarrutustarpeeseen on käyttää tasajännitevälipiirin rinnalle kytkettävää vastusta, jossa ylimääräinen välipiirin energia voidaan muuttaa lämmöksi.

Vaihtosuuntaukseen käytetään tehotransistoreja, joista tämän työn mittauksissa käytetään IGBT-komponenttiin (Insulated Gate Bipolar Transistor) perustuvaa vaihtosuuntaajaa. Vaihtosuuntaajan periaatteellinen kytkentä on esitelty kuvassa 3. Nähdään, että vaihtosuuntaajan kytkentä muistuttaa suuresti dioditasasuuntaajan kyt-

kentää. Diodit on korvattu transistoreilla, mutta jokaisen transistorin rinnalle on kytketty diodi. Selitys diodin tarpeelle on piirissä oleva induktanssi. Virran laskunopeus on induktanssien vaikutuksesta rajattu, ja transistorin sammussa täytyy induktiiviselle kommutointivirralla olla kulkutie, jotta vältetään transistorien rikkoutuminen.



Kuva 3: Vaihtosuuntaajan kytkentä

Kuvassa 4 esitellään periaatteellinen lohkokaavio taajuusmuuttajan säätöohjelmalle. Kaaviosta nähdään, että moottorisäädössä on takaisinkytkentöjä moottorista, ja sen tarkoituksena on muodostaa ohjausarvot lähtöjännitteelle ja -taajuudelle säätöön syötetyn ohjearvon perusteella. Vaihtosuuntaajan ohjaus voidaan toteuttaa ilman takaisinkytkentää.



Kuva 4: Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan säätöohjelman lohkokaavio kun kuormana on oikosulkumoottori [11]

Skalaariohjauksessa ei käytetä takaisinkytkentöjä. Ohjausjärjestelmään syötetään haluttu lähtötaajuus, jolloin ohjaus laskee taajuutta vastaavan staattorijännitteen moottorille. Tällöin saavutettava lopullinen moottorin pyörimisnopeus riippuu oikosulkumoottorin tapauksessa koneen jättämästä. Vääntömomentin muuttuessa myös



moottorin pyörimisnopeus muuttuu. [14]

Skalaarisäädössä ohjauksessa on takaisinkytketty nopeussäätö ja vääntömomenttisäätö. Näin saavutetaan parempi tarkkuus säätöjärjestelmään, mutta säädön dynaamiset ominaisuudet ovat heikot, sillä säätö perustuu moottorin pysyvän tilan sijaiskytkennästä saataviin yhtälöihin.

Kehittyneempi tapa säätää moottoria on vektorisäätö. Vektorisäädössä vaaditaan vääntömomentin ja käämivuon oloarvojen estimointia sekä muuttajan ohjausten määrittämistä koneen vektoriyhtälöihin perustuen. Vektorisäädön toteuttamiseen on monia tapoja.

Vaihtosuuntaajan ohjauksen tehtäväksi jää kuvan 4 mukaisten ohjearvojen  $u_{ohje}$  ja  $f_{ohje}$  muotoisen lähtöjännitteen muodostaminen. Tasasuuntaajan tuottamaa tasajännitettä katkotaan vaihtosuuntaajan kytkimillä esimerkiksi pulssinleveysmoduloinnin avulla. Pulssinleveysmoduloinnin toteutukseen yleinen tapa on sini-kolmiovertailu, jossa korkeataajuista kolmioaaltoa verrataan haluttuun sinimuotoiseen lähtöjännitteeseen. Tapauksessa, jossa tasasuuntaus tehdään diodisillalla, saadaan moottorin pääjännitteelle  $U_1$  yhtälö

$$U_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \frac{\hat{u}_{ref}}{\hat{u}_\Delta} \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} V_{LL} = \frac{\hat{u}_{ref}}{\hat{u}_\Delta} \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U \approx \frac{\hat{u}_{ref}}{\hat{u}_\Delta} 0,827 V_{LL}, \quad (4)$$

missä  $\hat{u}_{ref}$  on siniaallon amplitudi  
 $\hat{u}_\Delta$  on kolmioaallon amplitudi.

Yhtälöstä nähdään, että syöttöverkon ja moottorin nimellisjännitteiden ollessa samat, ei moottorille voida tuottaa nimellistä jännitettä. Muita vaihtosuuntaajan ohjaukseen käytettäviä modulointimenetelmiä ovat yliaaltojen eliminointimenetelmä sekä vektorimodulaatio.

Tämän työn testilaitteessa käytetään kaksivaihemodulointiin perustuvaa vaihtosuuntaajan ohjausta. Kaksivaihemoduloinnissa yksi moottorille menevistä kolmesta vaiheesta kytketään koko kuudesosajakson ajaksi joko positiiviseen tai negatiiviseen tasajännitteen potentiaaliin. Tällöin vain kahden vaiheen jännitteitä kytketään tasajännitepotentiaalista toiseen osajakson aikana. Näin toimimalla saadaan vähennettyä vaihtosuuntaajan kytkentähäviöitä kahteen kolmasosaan verrattuna tapaukseen, jossa jokaisella kytkentätaajuuden mukaisella jaksolla käännetään kytkimiä. [5]

Kehittynein säätömenetelmä on suora käämivuon ja vääntömomentin säätö DTC (Direct Torque Control), jossa vaihtosuuntaajan kytkimiä ohjataan suoraan avaruusvektorteorian avulla. Tämä säätötapa yhdistää moottorisäädön ja vaihtosuuntaajan ohjauksen. Säädön nopeus on ilmeinen, sillä jokaista kytkinten kääntöä edeltää laskenta, jossa määritetään jokaiseen tapaukseen paras vaihtosuuntaajan kytkinkombinaatio. Staattorivuon kasvattaminen onnistuu valitsemalla kytkinkombinaatio joka kasvattaa staattorivuon vektorin pituutta. Vääntömomenttisäätö onnistuu valitsemalla kytkinkombinaatio, joka joko suurentaa tai pienentää staattorin ja roottorin vuovektorien välistä vaihekulmaa. [14]

### 3 Syöttöverkon ominaisuudet

Erilaiset syöttöverkon olosuhteet vaikuttavat merkittävästi taajuusmuuttajan toimintapisteeseen. Lämpenemätestejä tehdessä tulee verkon tilan olla tunnettu ja tarvittaessa hallittu. Tässä kappaleessa esitellään syöttöverkon parametrejä, joita tulee hallita, jotta mittauksia pystytään toistamaan muuttumattomissa olosuhteissa.

#### 3.1 Kolmivaiheverkko

Ideaalisessa tapauksessa syöttöverkon jännitteen ja virran käyrämuodot ovat puhtaita siniaaltoja. Tehoelektroniikkalaitteet ottavat kuitenkin usein verkosta ei-sinimuotoisen virran. Fourier- muunnoksella tämä virta voidaan jakaa harmonisiin virtakomponentteihin. Määritellään aluksi jännite  $u(t)$ , virta  $i(t)$  ja teho  $p(t)$  ideaalisessa verkossa. [11]

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$i(t) = \hat{i} \sin(\omega t - \varphi) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (6)$$

$$p(t) = 2UI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos(\varphi) - UI \cos(2\omega t - \varphi) \quad (7)$$

missä  $\hat{u}$  on jännitteen huippuarvo  
 $U$  on jännitteen tehollisarvo  
 $\hat{i}$  on virran huippuarvo  
 $I$  on virran tehollisarvo  
 $\omega$  on verkon jännitteen ja virran kulmataajuus  
 $\varphi$  on jännitteen ja virran välinen vaihesiirto

Yhtälössä (7) lausekkeen alkuosa edustaa pätötehoa ja loppuosa vaihtovirran loistehoa. Yleisessä tapauksessa virta saadaan Fourier-sarjasta

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - \varphi_n), \quad (8)$$

jossa yksittäisen yliaallon amplitudi  $I_n$  ja vaihesiirto  $\varphi_n$  voidaan selvittää tuntemalla suuntaajakytkentä ja virran käyrämuoto.

Yleisesti, ei-sinimuotoinen toistuva käyrämuoto  $f(t)$  voidaan kirjoittaa Fourier- sarjana

$$f(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t), \quad (9)$$

jonka termit määritellään seuraavasti. [13]

$$F_0 = \frac{1}{2}a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t)d(\omega t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t)d(t) \quad (10)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t)\cos(n\omega t)d(\omega t) \quad n = 0, \dots, \infty \quad (11)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t)\sin(n\omega t)d(\omega t) \quad n = 0, \dots, \infty \quad (12)$$

Fourier-analyysin ideana on, että mikä tahansa ei-sinimuotoinen funktio voidaan esittää eritaajuisten sini- ja kosiniaaltojen summana. Fourier-sarjan komponentit ovat perustaajuuden moninkertoja, ja symmetrisissä tapauksissa voidaan usein eliminoida joko  $a_n$  tai  $b_n$  kerroin lopullisesta yhtälöstä.

Yhtälössä (13) ainoastaan tapauksessa  $n = 1$  saadaan lauseke, jolla on nollasta poikkeava keskiarvo. Näin pätöteho  $P$  muodostuu virran  $I_1$  ja jännitteen  $U$  perusaaltojen tulosta yhtälön (14) mukaisesti, jossa  $\varphi_1$  on jännitteen ja virran perusaallon vaihesiirtokulma.

$$\begin{aligned} u(t)i_n(t) &= 2UI_n\sin(\omega t)\sin(n\omega t - \varphi_n) \\ &= UI_n\{\cos[(n-1)\omega t - \varphi_n] - \cos[(n+1)\omega t - \varphi_n]\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$P = UI_1\cos\varphi_1 \quad (14)$$

Verkosta otettu kokonaisnäennäisteho  $S$  jakaantuu pätötehoksi  $P$ , perustaajuiseksi loistehoksi  $Q_1$  sekä yliaalto- eli särötehoksi  $Q_h$ . Perusaallolle määritetään tehokerroin  $\cos\phi_1$  yhtälön (15) mukaisesti ja kokonaistehokerroin  $\lambda$  yhtälön (16) mukaisesti.

$$\cos\phi_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_1^2}} \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_1^2 + Q_h^2}} \quad (16)$$

## 3.2 Harmoniset yliaallot

Harmoniset yliaallot ovat sinimuotoisia jännitteitä tai virtoja, joiden taajuudet ovat syöttöverkon taajuuden moninkertoja. Harmonista säröä verkossa aiheuttavat yleisesti laitteet, joiden kuormitusvirta ei ole sinimuotoinen. [6]

Säröytyneessä verkossa jännitteen ja virran käyrämuodot vääristyvät, jolloin virrassa esiintyy jännitteen perustaajuudesta poikkeavia komponentteja. Yliaallot ovat yleensä perustaajuuden moninkertoja, mutta myös muita taajuuskomponentteja esiintyy.

Jännitteen ja virran yliaaltosisällön määrittelemiseen käytetään monenlaisia käsitteitä. Tässä työssä käytetään särökertoimenä perusaallon tehollisarvon mukaan määriteltä variaatiota, josta käytetään lyhennettä THD (Total Harmonic Distortion).

$$U_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (17)$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (18)$$

Verkkokommutoitavan dioditasasuuntaajan verkkovirran yliaaltotaajuudet ovat  $p$ -pulsisuuntaajan tapauksessa muotoa

$$n = pk \pm 1 \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (19)$$

Nähdään, että kuusipulssisuuntaajan matalimmat yliaallot ovat viides ja seitsemäs yliaalto. Kolmivaiheiset taajuusmuuttajat eivät tuota kolmatta yliaaltoa. Suuntaajat näyttävät verkosta katsottua yliaaltovirtalähteiltä. Yliaaltovirrat  $I_{(n)}$  aiheuttavat yhdessä verkon impedanssin  $Z_{N(n)}$  kanssa verkkoon yliaaltojännitteitä  $U_{(n)}$  yhtälön 20 mukaisesti. [11]

$$U_{(n)} = Z_{N(n)} I_{(n)} \quad (20)$$

missä  $U_{(n)}$  on taajuuskomponenttia  $n$  vastaava yliaaltojännite  
 $Z_{N(n)}$  on taajuuskomponenttia  $n$  vastaava verkon impedanssi  
 $I_{(n)}$  on taajuuskomponenttia  $n$  vastaava yliaaltovirta

IEC:n standardeissa 61000-2-4 ja 61000-3-4 määritellään rajat yliaalloille teollisuuden syöttöverkoissa. Yhteensopivuusrajat, jotka standardissa määritellään päteivät pisteessä, johon kuorma on kytketty. Suurimmassa osassa tapauksista verkon parametrit voidaan määrittää suurjännitemuuntaajan toision puolelta. [7]

Teollisuusverkon jännitteen häiriötasot jaetaan kolmeen pääluokkaan:

**Luokka 1** Tähän luokkaan kuuluvat suojatut syöttöverkot, johon liitettävät laitteet vaativat paremman verkon kuin esimerkiksi julkisen syöttöverkon. Luokan piiriin kuuluvat esimerkiksi laboratorioissa käytettävät sähkölaitteet, tiettyt automaatio- ja suojalaitteet sekä tietokoneet.

**Luokka 2** Tähän luokkaan kuuluu suurin osa teollisuuden verkoista. Yhteensopivuusrajat ovat yleisesti identtiset julkisen syöttöverkon rajojen kanssa. Laitteita, jotka on suunniteltu käytettäväksi julkisessa syöttöverkossa, voidaan käyttää tämän luokan teollisuusverkossa.

**Luokka 3** Tämä luokka on käytössä vain teollisuusverkkojen sisäisissä osissa. Sen yhteensopivuusrajat ovat hieman suuremmat kuin luokassa kaksi, ja sen käyttöä kannattaa harkita, jos:

- Suurin osa kuormista syötetään taajuusmuuttajilla
- Kuormana on hitsauslaitteita
- Suuria moottoreita käynnistetään usein
- Kuormat muuttuvat nopeasti

Taulukossa 1 annettu luokan kolme jännitteen vaihteluväli pätee alle minuutin kestoissa häiriöissä. Keston ylittäessä minuutin on luokassa kolme voimassa samat jännitteen vaihteluvälit kuin luokassa kaksi. Taulukon arvoista nähdään, että verkon jännite saa vaihdella hyvinkin paljon ilman, että voidaan puhua häiriöstä verkossa.

Taulukko 1: Yhteensopivuusrajat jännitteelle, sen epäsymmetrialle sekä taajuudelle [7]

| Häiriö                                    | Luokka 1           | Luokka 2           | Luokka 3           |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| Jännitevaihtelu $\Delta U/U_n$            | $\pm 8 \%$         | $\pm 10 \%$        | $+10 \% - -15 \%$  |
| Jännitteen epäsymmetria $U_{neg}/U_{pos}$ | $2 \%$             | $2 \%$             | $3 \%$             |
| Syöttötaajuuden vaihtelu                  | $\pm 1 \text{ Hz}$ | $\pm 1 \text{ Hz}$ | $\pm 1 \text{ Hz}$ |

Taulukossa 2 esitellyt yliaaltojännitteet ovat niitä, joita kuusipulssiset diodisillat synnyttävät. Varsinkin laitteet, joissa ei käytetä kuristimia, synnyttävät runsaasti matalataajuisia yliaaltoja. Taulukossa 3 olevat yliaallot ovat kolmella jaollisia, ja kuusipulssisillat eivät synnytä niitä. Niiden päästörajat ovat matalampia kuin muiden parittomien harmonisten. Kolmannen yliaallon rajat ovat hieman korkeammat, sillä yksivaiheiset siltakytkennät synnyttävät kolmatta yliaaltoa. Vaikka yksivaiheisten laitteiden tehot ovat yleensä pieniä, yliaaltokompensoimattomat hakkuriteholähteet ovat yleinen särölähde. Esimerkiksi toimistoverkoissa pienitehoisia laitteita on usein paljon, jolloin niiden yhteisvaikutus säröyttää verkon jännitteen.

Tietyissä tapauksissa syöttöverkon osa sisältää vain suuria epäsymmetrisiä kuormia. Tällöin voidaan hyväksyä yliaallot, jotka ovat 1,2-kertaiset verrattuna taulukoissa 2 - 5 annettuihin arvoihin. Yhteensopivuusrajojen täytyä myös, jos mittaus tehdään IPC:n (In-plant Point of Coupling) sijasta PCC:stä (Public Point of Coupling).

Jännitteen kokonaissärökertoimelle annetut rajat on esitelty taulukossa 5.

Taulukko 2: Yhteensopivuusrajat jännitteen parittomille harmonisille, jotka eivät ole kolmella jaollisia [7]

| Järjestysluku<br>$h$ | Luokka 1<br>$U_h$ %        | Luokka 2<br>$U_h$ %        | Luokka 3<br>$U_h$ %      |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 5                    | 3                          | 6                          | 8                        |
| 7                    | 3                          | 5                          | 7                        |
| 11                   | 3                          | 3,5                        | 5                        |
| 13                   | 3                          | 3                          | 4,5                      |
| 17                   | 2                          | 2                          | 4                        |
| $17 < h \leq 49$     | $2,27 \cdot (17/h) - 0,27$ | $2,27 \cdot (17/h) - 0,27$ | $4,5 \cdot (17/h) - 0,5$ |

Taulukko 3: Yhteensopivuusrajat jännitteen kolmella jaollisille parittomille harmonisille [7]

| Järjestysluku<br>$h$ | Luokka 1<br>$U_h$ % | Luokka 2<br>$U_h$ % | Luokka 3<br>$U_h$ % |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 3                    | 3                   | 5                   | 6                   |
| 9                    | 1,5                 | 1,5                 | 2,5                 |
| 15                   | 0,3                 | 0,4                 | 2                   |
| 21                   | 0,2                 | 0,3                 | 1,75                |
| $21 < h \leq 45$     | 0,2                 | 0,2                 | 1                   |

Taulukko 4: Yhteensopivuusrajat jännitteen parillisille harmonisille [7]

| Järjestysluku<br>$h$ | Luokka 1<br>$U_h$ %        | Luokka 2<br>$U_h$ %        | Luokka 3<br>$U_h$ % |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|
| 2                    | 2                          | 2                          | 3                   |
| 4                    | 1                          | 1                          | 1,5                 |
| 6                    | 0,5                        | 0,5                        | 1                   |
| 8                    | 0,5                        | 0,5                        | 1                   |
| 10                   | 0,5                        | 0,5                        | 1                   |
| $10 < h \leq 50$     | $0,25 \cdot (10/h) + 0,25$ | $0,25 \cdot (10/h) + 0,25$ | 1                   |

Taulukko 5: Yhteensopivuusrajat jännitteen kokonaissärökertoimelle  $U_{THD}$  [7]

|  | Luokka 1 | Luokka 2 | Luokka 3 |
|--|----------|----------|----------|
| Jännitteen kokonaissärökerroin $U_{THD}$ | 5 %      | 8 %      | 10 %     |

Jännitteille annettujen rajojen lisäksi myös taajuusmuuttajan verkosta ottamille yliaaltovirroille on määritelty eri asteisiin jaetut rajat. Täyttääkseen standardin IEC 61000-3-4 vaatimukset täytyy yhtälössä (29) määritellyn oikosulkusuhteen olla vähintään 33. [9]

**Aste 1** Tähän asteeseen vaaditaan vähintään oikosulkusuhte  $R_{sce} \geq 33$ . Asteen virtarajat on esitelty taulukossa 6.

**Aste 2** Tässä asteessa virtarajat suurenevat oikosulkusuhteen kasvaessa. Virtarajat on esitelty taulukossa 7.

**Aste 3** Laite kuuluu asteeseen 3, kun laite ei täytä asteiden 1 tai 2 vaatimuksia, tai laitteen syöttövirta ylittää 75A. Tällöin verkkoon kytkettävistä laitteista ja niiden tehoista sovitaan sähköyhtiön kanssa.

Taulukko 6: Asteen 1 yhteensopivuusrajat harmonisille yliaaltovirroille [9]

| Harmonisen<br>järjestysluku<br>$n$ | Sallittu harmoninen<br>virta<br>$I_n/I_1$ %f |
|------------------------------------|--|
| 3                                  | 21,6   |
| 5                                  | 10,7   |
| 7                                  | 7,2  |
| 9                                  | 3,8  |
| 11                                 | 3,1  |
| 13                                 | 2  |
| 15                                 | 0,7  |
| 17                                 | 1,2  |
| 19                                 | 1,1  |
| 21                                 | $\leq 0,6$                                   |
| 23                                 | 0,9  |
| 25                                 | 0,8  |
| 27                                 | $\leq 0,6$                                   |
| 29                                 | 0,7  |
| 31                                 | 0,7  |
| 33                                 | $\leq 0,6$                                   |
| parilliset                         | $\leq 8/n$ tai $\leq 0,6$                    |

Yhtälöstä (20) nähdään, kuinka yliaaltovirroista saa laskettua yliaaltojännitteet verkon impedanssin avulla. Yhtälöstä nähdään, että verkon impedanssin pienentyessä yliaaltovirtojen jännitettä säröyttävä vaikutus pienenee. Verkon oikosulkutehon kasvaminen merkitsee yleensä verkon impedanssin pienenemistä. Tällöin kasvattamalla

Taulukko 7: Asteen 2 yhteensopivuusrajat harmonisille yliaaltovirroille [9]

| Minimi<br>oikosulkukerroin<br>$R_{sce}$ | Sallittu virran<br>särokerroin<br>$I_{THD}$ %f | Sallittu harmoninen<br>virta, %f |       |          |          |
|---|--|----------------------------------|-------|----------|----------|
|   |  | $I_5$                            | $I_7$ | $I_{11}$ | $I_{13}$ |
| 66                                      | 16   | 14                               | 11    | 10       | 8        |
| 120                                     | 18   | 16                               | 12    | 11       | 8        |
| 175                                     | 25   | 20                               | 14    | 12       | 8        |
| 250                                     | 35   | 30                               | 18    | 13       | 8        |
| 350                                     | 48   | 40                               | 25    | 15       | 10       |
| 450                                     | 58   | 50                               | 35    | 20       | 15       |
| 600                                     | 70   | 60                               | 40    | 25       | 18       |

verkon tehoa suhteessa käytettävän laitteen tehoon, saadaan laitteen verkon jännitettä säröyttävää vaikutusta pienennettyä. Tämä nähdään hyvin taulukosta 7. Oikosulkusuhteen kasvaessa suuretkin yliaaltovirrat aiheuttavat niin pienet yliaaltojännitteet verkkoon, ettei niistä ole haittaa. Tähän perustuvat oikosulkusuhteen mukaan suurenevat yliaaltovirtojen päästörajat.

### 3.3 Verkon jännitteiden epäsymmetrisyys

Jännitteiden epäsymmetria on tila, jossa kolmen vaihejännitteen amplitudit eroavat toisistaan, tai vaiheiden välillä oleva vaihesiirto poikkeaa normaalista 120 asteesta. Myös molemmat ehdot voivat toteutua yhdessä. Hallitseva syy verkon epäsymmetrisyyteen on tasapainottoman yksivaiheinen kuormitus. Pienjänniteverkoissa yksivaiheisia kuormia kytketään yhden verkon vaiheen ja nollajohtimen välille, vaikka syöttö olisikin kolmivaiheinen. Kahden vaiheen välille kytkettävän yksivaiheisen kuorman aiheuttama verkon epäsymmetria on käytännössä suoraan yhteydessä kuorman ja verkon oikosulkusuhteeseen.

Epäsymmetrisyyden suuruus määritetään käyttämällä symmetrisien komponenttien metodologiaa. Siinä lasketaan suhde negatiivisille ja positiivisille sekvenssivirroille. Positiiviset sekvenssivirrat ja -jännitteet ovat verkon symmetrisiä virtoja ja jännitteitä. Symmetrisessä verkossa kaikki virrat ja jännitteet ovat positiivisen sekvenssin suuria. [6]

Kun kolme vaihekuormaa kytketään kolmivaiheverkon vaiheiden välille, voidaan negatiivisen sekvenssin virtakomponentti laskea yhtälön (21) mukaisesti. Yhtälön vaihekulmat on määritetty siten, että kuormittamattoman tapauksen A-vaiheen jännitteen vaihekulma on valittu nollakohdaksi.



$$\underline{I}_{neg} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( |I_{ab}| \angle(\varphi_{ab} + \frac{\pi}{6}) + |I_{bc}| \angle(\varphi_{bc} - \frac{\pi}{2}) + |I_{ca}| \angle(\varphi_{ca} + \frac{5\pi}{6}) \right), \quad (21)$$

missä  $\underline{I}_{neg}$  on negatiivisen sekvenssin virta  
 $I_{ab}$  on vaiheiden a ja b välille kytketyn kuorman virta  
 $I_{bc}$  on vaiheiden b ja c välille kytketyn kuorman virta  
 $I_{ca}$  on vaiheiden c ja a välille kytketyn kuorman virta  
 $\varphi_{ab}$  on vaiheiden a ja b välille kytketyn kuorman virran vaihekulma  
 $\varphi_{bc}$  on vaiheiden b ja c välille kytketyn kuorman virran vaihekulma  
 $\varphi_{ca}$  on vaiheiden c ja a välille kytketyn kuorman virran vaihekulma.

Negatiiviset sekvenssivirrat  $\underline{I}_{neg}$  aiheuttavat verkkoon negatiivisen sekvenssin jännitteitä  $\underline{U}_{neg}$ . Muodostuvien jännitteiden suuruus riippuu verkon negatiivisen sekvenssin impedanssista  $\underline{Z}_{neg}$ , jonka voi olettaa olevan samansuuruinen positiivisen sekvenssin impedanssin eli verkon normaalin impedanssin kanssa. Negatiivisten sekvenssivirtojen ja -jännitteiden vektorien pyörimissuunta on vastakkainen positiivisen sekvenssin symmetrisen komponenttien vektoreiden kanssa. [8]

Yhtälössä (22) on määritetty verkon suhteellinen epäsymmetria  $u_{neg}$ .

$$u_{neg} = \frac{U_{neg}}{U_{pos}} = \frac{|\underline{I}_{neg}|}{I_{sc}}, \quad (22)$$

missä  $\underline{U}_{neg}$  on negatiivisen sekvenssin jännite  
 $\underline{U}_{pos}$  on positiivisen sekvenssin jännite eli symmetrisen verkon jännite  
 $\underline{I}_{neg}$  on negatiivisen sekvenssin virta  
 $I_{sc}$  on kolmivaiheinen oikosulkuvirta pisteessä IPC.

### 3.4 Verkon ominaisarvot

Verkon oikosulkutehon ja verkkoon kytketyn laitteen nimellistehon välinen oikosulkusuhte on tärkeää määrittää, jos halutaan jälkikäteen tehdä mittauksia mahdollisimman samankaltaisessa verkossa. Sähköverkosta puhuttaessa käytetään usein käsitettä jäykkä verkko. Tällä tarkoitetaan, että verkon oikosulkuteho on hyvin suuri verrattuna sitä kuormittavaan tehoon. Tällöin verkon impedanssit ovat hyvin pieniä, eivätkä kuormittavat laitteet vaikuta merkittävästi verkon jännitteen käyrämuotoon.

Verkon osaa syöttävälle muuntajalle määritetään nimellisarvot, jotka kuvaavat muuntajan tärkeimpiä ominaisuuksia. Muuntajan nimellisarvoja ovat ensiön ja toisin nimellisjännitteet  $U_{1N}$  ja  $U_{2N}$ , nimellisvirrat  $I_{1N}$  ja  $I_{2N}$ , nimellisteho  $S_N$  sekä nimellisimpedanssit  $Z_{1N}$  ja  $Z_{2N}$ . Muuntajan nimellinen kuormitettavuus ilmoitetaan näennäistehona, koska muuntajan käämien häviöt riippuvat niiden läpi kulkevasta virrasta. Virran vaihekulmalla ei ole merkitystä käämien häviöihin.

Muuntajan nimellisteho määritetään ensiön tai toision nimellisjännitteiden ja -virtojen avulla yhtälön (23) mukaisesti.

$$S_N = U_{1N}I_{1N} = U_{2N}I_{2N} \quad (23)$$

Ensiön ja toision nimellisimpedanssit ovat

$$Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{U_{1N}^2}{S_N} \quad (24)$$

$$Z_{2N} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}} = \frac{U_{2N}^2}{S_N}. \quad (25)$$

Muuntajan leimausarvoihin kuuluvat myös oikosulkuimpedanssi  $Z_k$ , oikosulkuresistanssi  $R_k$  sekä oikosulkureaktanssi  $X_k$ . Nämä arvot ilmoitetaan usein suhteellisarvoina, jolloin niitä verrataan nimellisimpedanssiin  $Z_N$ . Suhteellisarvoja merkitään pienellä kirjaimella, ja niiden lukuarvot voidaan ilmoittaa myös prosentteina. Yhtälöistä (26), (27) ja (28) saadaan suhteellisarvoiset oikosulkuimpedanssi  $z_k$ , -resistanssi  $r_k$  sekä -reaktanssi  $x_k$ . Yhtälöissä virta on kulman  $\varphi$  verran jännitettä jäljessä. [12]

$$z_k = \frac{Z_k}{Z_N} = \frac{Z_k I_N}{U_N} = \frac{U_k}{U_N} = u_k \quad (26)$$

$$r_k = \frac{R_k}{Z_N} = z_k \cos \varphi \quad (27)$$

$$x_k = \frac{X_k}{Z_N} = z_k \sin \varphi \quad (28)$$

Oikosulkusuhde  $R_{sce}$  saadaan yhtälöstä (29). Yhtälössä (30) määritetään syöttöverkon oikosulkuteho  $S_{sc}$  ja yhtälössä (31) laitteen nimellinen näennäisteho  $S_{equ}$ . Käytetty laitteen nimellistehon laskukaava pätee kolmivaiheiselle laitteelle, jonka nimellinen syöttövirta on  $i_{equ}$ . [9]

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_{equ}} \quad (29)$$

$$S_{sc} = \frac{V_{LL}^2}{Z_k} \quad (30)$$

$$S_{equ} = \sqrt{3} V_{LL} I_{equ} \quad (31)$$

## 4 Taajuusmuuttajan häviölähteiden analyysi

Lämpenemätesteillä halutaan varmistaa, että suunniteltu laite toimii luotettavasti kaikissa kuormitustilanteissa. Tällöin myös taajuusmuuttajan suunnittelussa on täytynyt huomioida erilaisten verkko-olosuhteiden vaikutus komponenttien lämpenemisiin. Tässä kappaleessa kuvaillaan komponenttikohtaisesti tehohäviöiden lähteet. Näin pystytään paremmin ymmärtämään miten muuttuvat verkko-olosuhteet vaikuttavat testattavan laitteen lämpötiloihin.

Aluksi käsitellään taajuusmuuttajan toimintaan vaikuttavien induktiivisten komponenttien toimintaa. Sen jälkeen käsitellään kolme tämän työn mittauksissa tutkittua komponenttia: tasasuuntaaja, tasajännitekondensaattorit sekä vaihtosuuntaaja. Kaikista kolmesta esitetään yhtälöt tehohäviöille, jolloin nähdään mistä syöttöverkon suureista eri komponenttien häviöt ovat riippuvaisia.

### 4.1 Induktiiviset komponentit

Tässä työssä mittaukset on tehty laitteella, jonka tulopuolella ei ollut kuristinta. Kuitenkin jokaisessa sähköverkossa on induktanssia, ja pienitehoinen syöttöverkko saattaa sisältää hyvinkin suuren impedanssin. Kuristimien peruseräpäätteen on siksi esitelty myös tässä työssä.

Kuristimen ja muuttajan toiminta perustuu magneettikenttiin. Kuristin on tietysti tapaa samanlainen kuin muuntaaja, siitä ainoastaan puuttuu toisio. Suurin ero syntyy siinä, miten magneettikenttää pyritään käyttämään hyödyksi. Muuntajassa halutaan välttää energian varastoitumista magneettikenttään, ja kuristimessa magneettikenttään pyritään varastoimaan mahdollisimman suuri energia. Muuntajissa käytetäänkin usein suuren permeabiliteetin omaavaa sydäntä, jossa ei yleensä ole ilmavälejä. Kuristimessa taas on yksi tai useampia ilmavälejä, joihin energiaa saadaan varastoitua. Ilmasydämisessä kuristimessa ei käytetä lainkaan rautasydäntä.

Tavallisin käyttötarkoitus tehoelektroniikassa käytettävälle kuristimelle on tasasuuntaajan virran suodatus. Tämän tyyppiset kuristimet ovat pientaajuisia ja usein ilmajähdytteisiä. Käämitys niissä on tehty kuparista tai alumiinista. Kuristin voidaan asentaa tasasähköpuolen lisäksi myös syöttöverkon puolelle, jolloin kolmivaiheisella syötöllä käytetään kolmivaiheista kuristinta. Kuristimen häviöt riippuvat pääasiassa virrasta. Vaihtosähköpuolelle kytketyn kuristimen läpi kulkevasta virrasta suuri osa on yliaaltovirtaa, joka lisää kuristimen häviöitä. [15]

### 4.2 Tasajännitekondensaattorit

Tasajännitekondensaattoreita käytetään jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan välipiirissä pienentämään jännitevaihtelua. Jänniteenvaihtelua aiheuttaa tasasuuntaajan virran muutos. Kondensaattorin jännite  $u_C$  voidaan määrittää seuraavasti:

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_C dt + R_{ESR} i_C + L_C \frac{di_C}{dt}, \quad (32)$$

missä  $C$  on kondensaattorin kapasitanssi  
 $R_{ESR}$  on kondensaattorin sisäinen resistanssi  
 $L_C$  on kondensaattorin hajainduktanssi  
 $i_C$  on kondensaattorin virta.

Kondensaattorin virran merkitsevät taajuuskomponentit ovat yleensä niin matalataajuisia, ettei kondensaattorin hajainduktanssilla  $L_C$  ole käytännön merkitystä. Etenkin elektrolyyttikondensaattoreilla kondensaattorin sisäinen resistanssi  $R_{ESR}$  on merkittävä jo muutaman kilohertsin taajuudesta alkaen.

Kondensaattori mitoitetaan lämpenemämielessä sitä kuormittavan virran mukaan. Lisäksi täytyy varmistaa riittävä jännitekestoisuus, jotta vältetään kondensaattorin välitön rikkoutuminen. [15]

Kondensaattorin häviöteho  $P_{dis}$  määritetään yhtälön (33) mukaisesti.

$$P_{dis} = I_{C,RMS}^2 R_{ESR} = \sum_n I_{C(n)}^2 R_{ESR(n)} \quad (33)$$

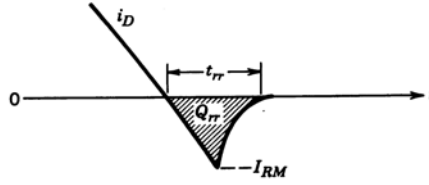
Kondensaattorin analyttisten häviöiden määrittäminen on hankalaa, koska tällöin täytyisi tuntea kondensaattorin läpi kulkevat virrat taajuuskomponenteittain. Myös kondensaattorin taajuusriippuvainen sarjavastus tulee tuntea, jotta yhtälöä (33) voidaan käyttää tehohäviöiden määrittämiseen. Kondensaattorin virta muodostuu tassauntaajan syöttämän ja vaihtosuuntaajan kuormittavan virran erotuksena. Tällöin muutos kumman tahansa suuntaajan toimintapisteessä muuttaa kondensaattorin toimintapistettä.

### 4.3 Diodit

Diodi on puolijohdekykin, jolla on kaksi liitäntää, anodi ja katodi. Diodi johtaa sähkövirtaa päästösuuntaan anodilta katodille, jolloin diodin yli jää päästöjännite, joka on yhden voltin suuruusluokkaa. Kun diodin yli vaikuttaa estosuuntainen jännite, sen läpi kulkee pieni vuotovirta, kunnes estojännite kasvaa läpilyöntijännitteen suuruiseksi ja komponentti rikkoutuu.

Diodin kytkentäaika on hyvin lyhyt, ja sitä voidaan pitää ideaalisena kytkimenä. Virtaa katkaistaessa diodi johtaa virtaa estosuuntaan toipumisajan  $t_{rr}$ . Tämä aika vaaditaan, jotta diodin puolijohteen varauksenkuljettajat poistuvat tyhjennysalueelta. Diodin takavirtaa esitellään kuvassa 5. [13]

Diodin johtohäviöt muodostuvat päästöjännitteen ja virran aritmeettisen keskiarvon  $I_{avg}$  tulona. Päästöjännite voidaan jakaa liitosjännitteestä  $V_j$  ja ohmisesta resistanssista  $R_{on}$  aiheutuviin komponentteihin.



Kuva 5: Diodin takavirta [13]

Diodin tehohäviöksi  $P_{dis}$  saadaan

$$P_{dis} = V_j I_{avg} + R_{on} I_{RMS}^2. \quad (34)$$

Yhden diodin läpi kulkeva virta saadaan välipiirin virrasta  $I_d$  yhtälön (35) mukaisesti. [19]

$$I_{avg} = \frac{I_d}{3} \quad (35)$$

Diodin takavirta muodostuu ongelmaksi, kun diodilta vaaditaan nopeaa toimintaa. Diodin takavirran yhtälöä voidaan yksinkertaistaa olettamalla takavirran käyrämuoto kolmioksi. Tällöin diodin takavirrasta aiheutuva varaus on

$$Q_{rr} = \frac{I_{RRM} t_{rr}}{2} \quad (36)$$

Takavirran merkitys diodin häviöihin on kuitenkin pienjännitteisillä ja verkkotaajuisilla diodeilla pieni. Käytännössä vasta yli 2000 voltin jännitteillä takavirrasta alkaa aiheutua merkittäviä tehohäviöitä. [15]

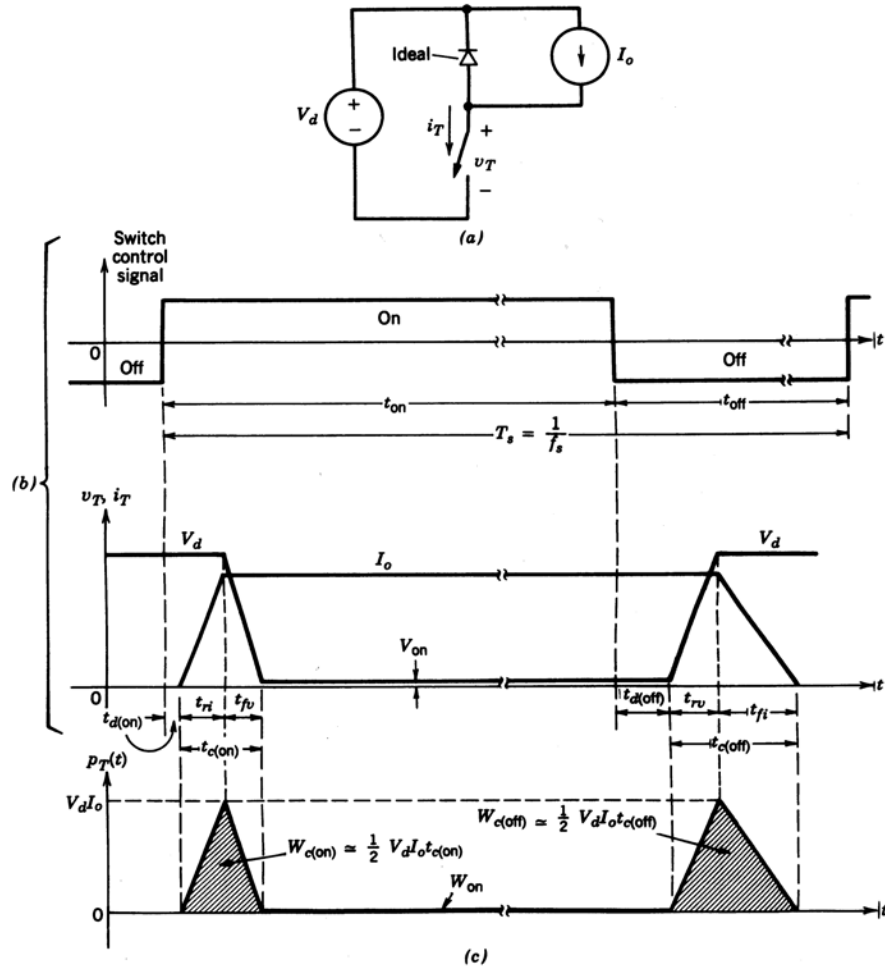
## 4.4 IGBT

Ideaalinen kytkin toimii siten, että se estää mielivaltaisen suuren jännitteen ilman, että virtaa kulkee kytkimen lävitse. Johtaessaan kytkin toimii ideaalisena johteena, eli sen yli ei muodostu jännitettä. Kytkemiset ja katkaisut tapahtuvat äärettömän nopeasti, ja ohjaukseen tarvitaan häviävän pieni teho.

Todellisuudessa mikään näistä ominaisuuksista ei toteudu, vaan komponentit kuluttavat tehoa toimiessaan. Kytkimen toimintaa ja häviöitä on esitelty kuvassa 6.

Kun puolijohdekytkin muuttaa tilaansa, kuluu energiaa, kuten kuvassa 6 on esitetty. Tehohäviöihin vaikuttaa näin suoraan käytettävä kytkentätaajuus. [13]

Kytkimen kytkemis- ja katkaisuhäviöihin kuluvat energiat  $W_{sw,on}$  ja  $W_{sw,off}$  voidaan kirjoittaa yhtälöiden (37) ja (38) mukaisesti.



Kuva 6: Puolijohdekytkimen yleiset kytkentäominaisuudet: (a) yksinkertaistettu piiri, (b) kytkentöjen jännitteen ja virran käyrämuodot, (c) tehohäviöt kytkimessä [13]

$$W_{sw,on} \approx \frac{1}{2} V_d I_{IGBT} t_{sw,on} \quad (37)$$

$$W_{sw,off} \approx \frac{1}{2} V_d I_{IGBT} t_{sw,off}, \quad (38)$$

missä  $V_d$  on tasajännite  
 $I_{IGBT}$  on IGBT:n virta  
 $t_{sw,on}$  on IGBT:n kytkentäaika  
 $t_{sw,off}$  on IGBT:n katkaisuaika.

Kytkeä- ja katkaisuhäviöihin kuluva teho  $P_s$  saadaan yhtälöstä (39), kun kytkentätaajuus on  $f_s$ .

$$P_s = f_s (W_{sw,on} + W_{sw,off}) = f_s \frac{1}{2} V_d I_{IGBT} (t_{sw,on} + t_{sw,off}) \quad (39)$$

Johtohäviöenergia  $W_{on}$  voidaan kirjoittaa yhtälön (40) mukaisesti.

$$W_{on} = V_{IGBT,on} I_{IGBT} t_{on}, \quad (40)$$

missä  $V_{IGBT,on}$  on IGBT:n yli oleva jännite sen johtaessa  
 $t_{on}$  on IGBT:n johtoaika.

Johtoaajan häviötehoksi  $P_{on}$  saadaan

$$P_{on} = V_{on} I_{IGBT} t_{on} f_s = V_{IGBT,on} I_{IGBT} \frac{t_{on}}{T_s}, \quad (41)$$

missä  $T_s$  on yhden kytkentäjakson jaksonaika.  
 $\frac{t_{on}}{T_s}$  on suhteellinen johtoaika kytkentäjakson aikana.

Pulssinleveysmoduloinnilla toteutettu vaihtosuuntaajan ohjaus muodostaa halutun lähtöjännitteen vaikuttamalla juuri IGBT:n suhteelliseen johtoaikaan kytkentäjakson aikana. Seuraavaksi esitetään yhtälöt, jossa muuttuva pulssisuhde on huomioitu. Tämän työn vaihtosuuntaajan häviöiden arvioimisessa käytetään lähteissä [17] ja [3] käytettyä tapaa. Seuraavaksi esitellään edellisissä lähteissä saavutettujen häviölaskeelmien tärkeimmät tulokset.

Muuttuva pulssisuhde  $\delta$  saadaan yhtälöstä

$$\delta = \frac{1}{2} [1 + m_a \sin(x + \varphi)], \quad (42)$$

missä  $\varphi$  on vaihekulma  
 $m_a$  on amplitudimodulaatiokerroin.

Johtohäviöt määritetään vaihtosuuntaajan yhdelle IGBT- komponentille yhtälön (43) mukaisesti ja sitä vastaavalle diodille yhtälön (44) mukaisesti.

$$P_{IGBT} = \left( \frac{1}{8} + \frac{m_a}{3\pi} \cos\varphi \right) R_{on} I_{IGBT,max}^2 + \left( \frac{1}{2\pi} + \frac{m_a}{8} \cos\varphi \right) V_{IGBT,on} I_{IGBT,max} \quad (43)$$

$$P_{diodi} = \left( \frac{1}{8} - \frac{m_a}{3\pi} \cos\varphi \right) R_{on} I_{IGBT,max}^2 + \left( \frac{1}{2\pi} - \frac{m_a}{8} \cos\varphi \right) V_{diodi,on} I_{IGBT,max}, \quad (44)$$

missä  $I_{IGBT,max}$  on IGBT:n virran huippuarvo  
 $V_{diodi,on}$  on vaihtosuuntaajan diodin johtotilan jännite  
 $V_{IGBT,on}$  on IGBT:n johtotilan jännite  
 $R_{on}$  on johtotilan resistanssi.

Kytkehäviöt  $P_{sw,on}$  ja katkaisuhäviöt  $P_{sw,off}$  määritetään yhdelle IGBT-komponentille yhtälöiden (45) ja (46) mukaisesti.

$$P_{sw,on} = \frac{1}{8} V_d t_{sw,on} \frac{I_{IGBT,max}^2}{I_{IGBT,nim}} f_s \quad (45)$$

$$P_{sw,off} = V_d I_{IGBT,max} t_{sw,off} \left( \frac{1}{3\pi} + \frac{1}{24} \frac{I_{IGBT,max}}{I_{IGBT,nim}} \right) f_s, \quad (46)$$

missä  $I_{IGBT,nim}$  on IGBT:n virran nimellisarvo.



## 5 Lämpötilamittauksen toteutus

Lämpötilan mittaamiseen on kehitetty lukuisia erilaisia tapoja, joista jokaisella on omat erityispiirteensä ja käyttökohteensa. Käytettävä mittaustapa on usein kompromissi mittaustarkkuuden, kustannusten, mittarin kestävyys- sekä käytettävyyden välillä. Tämän diplomityön mittaukset on tehty termoparimenetelmällä. Vertailun vuoksi on aluksi käsitelty muita yleisiä lämpötilanmittaustapoja ja niiden erityispiirteitä.

### 5.1 Erilaisia lämpötilanmittausmenetelmiä

Lämpötilan mittaaminen on oleellinen osa mittaustekniikkaa, koska luonnonilmiöt riippuvat tavalla tai toisella lämpötilasta. Kemian- ja prosessiteollisuudessa epätarkkuus lämpötilanmittauksessa saattaa näkyä jopa taloudellisessa tuloksessa. Tässä kappaleessa keskitytään teollisuudessa yleisesti käytössä oleviin mittarityyppeihin. Erilaiset lämpömittarit voidaan jaotella esimerkiksi seuraavasti:

- Ainemäärän tilavuuden, pituuden tai paineen muutoksiin perustuvat mekaaniset neste-, kaasu-, höyrynpaine- ja bimetallilämpömittarit
- Sähköisen suureen muuttumiseen perustuvat sähköiset metallivastusmittarit, termistorit ja termoelementit
- Säteilyn mittaamiseen perustuvat optiset pyrometrit
- Puolijohdeteknologiaan perustuvat, esimerkiksi IC-lämpömittarit

#### 5.1.1 Nestepatsaslämpömittarit

Nestepatsaslämpömittari on vanhin, ja edelleen käytetyin lämpömittarityyppi. Mittarin täyttönesteen lämpötilakerroin on huomattavasti lasikuoren lämpötilakerrointa suurempi, jolloin nesteen pinta mittarissa nousee ja laskee lämpötilan muuttuessa. Useimmiten nestepatsaslämpömittarit kalibroidaan kokonaan upotettuina mitattavaan aineeseen, jolloin mittarin käyttö osittain upotettuna aiheuttaa virhettä mitaustulokseen. Nestelämpömittarin tarkkuus ja vasteaika vaihtelevat huomattavasti mittarin rakenteesta ja mittaolosuhteista riippuen. Kokonaan upotettavilla mittareilla epätarkkuus on parhaimmillaan 0,02 °C. Lasisen elohopeamittarin vasteaika virtaavassa vedessä on parhaimmillaan 0,1 sekuntia. [10]

#### 5.1.2 Bimetallilämpömittarit

Bimetallilämpömittareissa kaksi ohutta metalliliuskaa on valssattu yhteen ja taivutettu spiraaliksi tai kierteeksi. Liuskojen materiaaleilla on erilaiset lämpötilakertoimet. Lämpötilan muuttuessa suuremman lämpötilakertoimen omaava liuska pyr-

kii laajenemaan tai supistumaan toista liuskaa enemmän, mistä seuraa liuskaparin kiertäminen. Näitä mittareita käytetään edullisina mittareina sovelluksissa, joissa ei aseteta suuria tarkkuusvaatimuksia. Parhaimmillaan bimetallilämpömittareilla päästään noin  $\pm 1$  °C epätarkkuuteen huonelämpötilassa. Bimetallilämpömittarin vasteaika on yleensä nestepatsaslämpömittaria pidempi. [10]

### 5.1.3 Metallivastuslämpömittarit

Metallivastuslämpömittarin toiminta perustuu H. Davyn vuonna 1821 havaitsemaan ilmiöön. Hän havaitsi, että metallivastuksen resistanssi  $R(T)$  on riippuvainen lämpötilasta  $T$ . Käytännön mittauksissa riippuvuus voidaan kirjoittaa muodossa

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T), \quad (47)$$

missä  $\alpha$  on resistanssin lämpötilakerroin.

Kansainvälisessä standardissa IEC 60751 on määritelty metallivastusantureiden resistanssin ja lämpötilan välinen riippuvuus. Anturin lämpötila saadaan selville mittaamalla sen resistanssi ja katsomalla taulukosta tätä arvoa vastaava lämpötila.

Yleinen tapa tarkkaan resistanssimittaukseen on nelipistemittaus, jossa anturiin syötetään vakiovirta, ja jännite sen yli mitataan suuri-impedanssisella jännitemittarilla. Anturin läpi kulkeva virta aiheuttaa anturin lämpenemistä ja siten mittausvirheen. Lämpenemisvirhe on mittausvirran anturin resistanssin lisäksi riippuvainen myös materiaaleista ja mahdollisista jäädyttävistä virtauksista. [10]

### 5.1.4 Termistorit

Termistorit ovat puolijohteista valmistettuja lämpötila-antureita, joiden toiminta perustuu metallivastuslämpömittareiden tapaan resistanssin lämpötilariippuvuuteen. Termistorien lämpötilakerroin on metallivastusten lämpötilakertoimiin verrattuna noin kymmenkertainen, mutta erittäin epälineaarinen. Yleisimpiä ovat termistorit, joiden lämpötilakerroin on negatiivinen eli niiden resistanssi pienenee lämpötilan kasvaessa. Näitä termistoreita kutsutaan NTC-termistoreiksi (Negative Thermal Coefficient). NTC-termistorien lisäksi markkinoilla on PTC-termistoreita (Positive Thermal Coefficient), joiden lämpötilakerroin on tietyllä lämpötila-alueella positiivinen. [10]

Termistorin resistanssin  $R_T$  muutos noudattaa yhtälöä

$$R_T = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}, \quad (48)$$

missä  $R_0$  on resistanssin arvo referenssilämpötilassa  $T_0$  (Kelvineissä)  
 $R_T$  on resistanssin arvo lämpötilassa  $T$   
 $\beta$  on kerroin, joka riippuu termistorin valmistusprosessista ja rakenteesta  
 $\beta$  on yleensä suuruusluokkaa 3500 K.

Termistorit ovat epähomogeenisia ja niiden stabiilius on usein huono. Tästä syystä hyvään tarkkuuteen pääseminen edellyttää termistorin kalibrointia usein, kun systeemissä oleva anturi vaihdetaan uuteen. Termistorin nimellisresistanssi on suuri verrattuna metallivastuslämpömittariin, joten mittausjohtimien resistanssin aiheuttama virhe pienenee huomattavasti.

### 5.1.5 Optiset mittarit

Lämpöenergia voi siirtyä paikasta toiseen johtumisen ja kulkeutumisen lisäksi myös sähkömagneettisena säteilynä. Sähkömagneettisen säteilyn kohdatessa aineen osa säteilyenergiasta absorboituu, osa heijastuu ja osa läpäisee aineen. Aineen absorptiosuhteen  $\alpha$ , heijastumissuhteen  $\sigma$  ja läpäisyysuhteen  $\tau$  välillä vallitsee seuraava yhteys

$$\alpha + \sigma + \tau = 1 \quad (49)$$

Mustalla kappaleella tarkoitetaan ideaalista kappaletta, joka absorboi kaikein siihen osuvan säteilyn sen taajuudesta ja tulosuunnasta riippumatta. Mustan kappaleen absorptiosuhde  $\alpha = 1$ . Kappaleen absorptiosuhteella eli emissiviteetillä tarkoitetaan kappaleen kykyä emittoida säteilyä. Säteilyn teho/pinta-ala on lämpötilan funktio, ja se voidaan laskea Planckin säteilykaavasta

$$f(\lambda) = \frac{1}{\lambda^5} \frac{2hc^2}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (50)$$

missä  $h$  on Planckin vakio ( $= 6,6256 \cdot 10^{-34} Js$ )  
 $c$  on valon nopeus tyhjiössä ( $= 3,00 \cdot 10^8 m/s$ )  
 $k$  on Boltzmannin vakio ( $= 1,3805 \cdot 10^{-23} J/K$ )  
 $T$  on lämpötila kelvineinä.

Kappaleen lähettämä kokonaissäteilyteho  $F$  pinta-alayksikköä kohden saadaan Stefan-Boltzmannin laista

$$F = \epsilon \sigma T^4, \quad (51)$$

missä  $\epsilon$  on kappaleen keskimääräinen emissiviteetti  
 $\sigma$  Stefan-Boltzmannin vakio ( $= 5,6686 \cdot 10^{-12} Wcm^{-2}K^{-4}$ )  
 $T$  säteilypinnan absoluuttinen lämpötila.

Yhtälön (51) mukaisesti kappaleen lähettämä lämpösäteilyn määrä riippuu kohteen lämpötilan lisäksi myös kappaleen emissiviteetistä. Ainoastaan ideaalisen mustan kappaleen emissiviteetti on yksi. Jotta optista mittaria eli pyrometria voidaan käyttää lämpötilanmittaukseen tulee mitattavan kappaleen emissiviteetti tuntea. [10]

Pyrometri on kehitetty alunperin korkeiden lämpötilojen mittaamiseen, joihin muut lämpötilan mittausmenetelmät eivät soveltuneet. Osittaissäteilypyrometrissä mitattavasta kohteesta tulevaa säteilyä verrataan tunnetun vertailusäteilijän lähettämään

säteilyyn. Kokonaissäteilypyrometrissä kappaleen lämpötila määritetään mittaamalla kappaleen lähettämä kokonaissäteilyteho pinta-alayksikköä kohden. Optinen pyrometri mittaa yhdellä aallonpituudella joka on tyypillisesti 650 tai 900 nanometriä.

### 5.1.6 Puolijohdelämpömittarit

Metallivastusantureiden, termistorien ja termoelementtien lähtösuureet muuttuvat suhteellisen vähän lämpötilan muuttuessa. Tämän vuoksi näiden anturien käyttö edellyttää tavallisesti vahvistimen käyttöä riittävän erotuskyvyn saavuttamiseksi. Mikroelektroniikan kehittymien on mahdollistanut lämpötila-anturien ja signaalinkäsittelyelektroniikan valmistamisen samaan IC-piiriin. [10]

## 5.2 Termopari lämpötilanmittausmenetelmänä

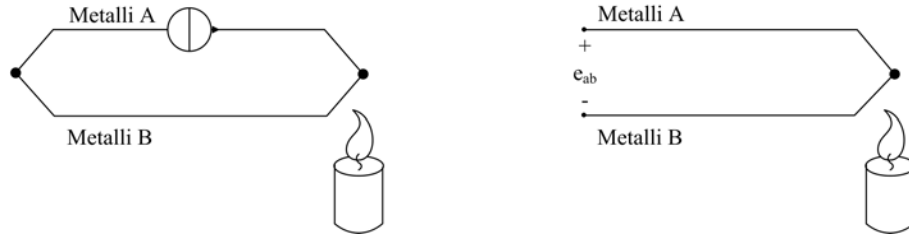
Kappaleessa 5.1 on esitelty erilaisia lämpötilanmittausmenetelmiä. Jokaisella on omat etunsa. Esimerkiksi pyrometri sopii hyvin tilanteeseen, jossa täytyy vertailla erilaisten kappaleiden lämpötiloja keskenään, ottamatta kantaa niiden absoluuttisiin lukuarvoihin. On kuitenkin huomattu, että tarvittaessa ahtaisiin olosuhteisiin soveltuvaa lämpötilanmittausta, on termopari houkutteleva vaihtoehto. Termopari ei ole tarkin lämpötilanmittaustapa, mutta tarjoaa hyvän käytettävyyden monenlaisiin olosuhteisiin.

Termoparin käsittely on erotettu tässä työssä omaksi kokonaisuudekseen, ja sen käsittely on laajempi kuin muiden työssä esiteltyjen lämpötilanmittaustapojen. Termopareja käytetään työn lämpötilamittauksissa pääasiallisena lämpötilanmittauskeinona. Vertailtaessa muihin lämpötilanmittaustapoihin termoparin etuja ovat hyvä käytettävyys ja pieni anturin koko. Haittapuolena voidaan pitää keskinkertaista tarkkuutta sekä termoparin toiminnan heikkenemistä ikääntyessään.

### 5.2.1 Termoparimittauksen toimintaperiaate

Termoparin toiminta perustuu T. Seebeckin vuonna 1821 havaitsemaan ilmiöön, jossa kahdesta eri materiaalista valmistetuista johteista muodostetussa silmukassa kulkee virta kuvan 7 mukaisesti, kun silmukan päät ovat eri lämpötiloissa. Jos silmukka avataan keskikohdastaan, syntyy päiden välille Seebeckin jännite  $e_{AB}$ , joka on riippuvainen metalliliitosten lämpötilaerosta ja käytetyistä kahdesta metallista. Kuvasta 7 nähdään, että termoparipiiriin muodostuu aina vähintään kolme metalliliitosta. [10]

Pienillä lämpötilan muutoksilla Seebeckin jännite on lineaarisesti riippuvainen lämpötilasta yhtälön (52) mukaisesti.

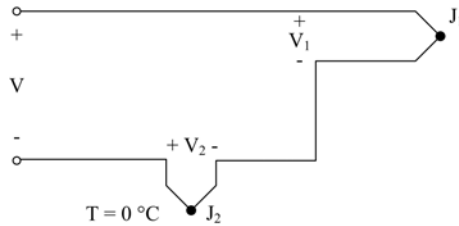


Kuva 7: Seebeckin virran ja jännitteen muodostuminen

$$e_{ab} = \alpha \cdot T, \quad (52)$$

jossa  $\alpha$  on termoparin herkkyys. Todellisuudessa  $\alpha$  ei ole vakio, vaan vaihtelee lämpötilan mukaan termoparityypistä riippuen.

Absoluuttisen lämpötilan määrittämiseksi termoparipiiriä tulee muokata siten, että vain yksi piiriin jännitettä aiheuttavista liitoslämpötiloista on tuntematon. Oletetaan, että käytetään lämpötilanmittaukseen tyypin T, kupari-konstantaani, termoparia. Oletuksella, että mittalaitteen terminaalit ovat myös kupariset, voidaan kuvan 8 kytkentä toteuttaa siten, että molemmat terminaaletihin kytkettävät termoparilangat ovat kuparisia. Tällöin terminaaaleissa ei muodostu termojännitettä, ja ainoat termojännitteen muodostavat liitokset piirissä ovat  $J_1$  ja  $J_2$ . [1]



Kuva 8: Ulkoinen referenssilämpötila

Jos referenssiliitoksen  $J_2$  lämpötila asetetaan tunnettuun lämpötilaan, näkyy jännitemittarin terminaaaleissa suoraan referenssiliitoksen ja mittausliitoksen lämpötilaeron aiheuttama jännite. Kuvan 8 tapauksen  $0\text{ °C}$  referenssiliitos voidaan toteuttaa jäävesihauteella, joka jatkuvan faasimuutoksen ansiosta pysyy tasan  $0\text{ °C}$  lämpötilassa.

Nyt piirissä on vain yksi tuntematon lämpötila,  $t_{J_1}$ .

$$V = (V_1 - V_2) \cong \alpha(t_{J_1} - t_{J_2}) \quad (53)$$

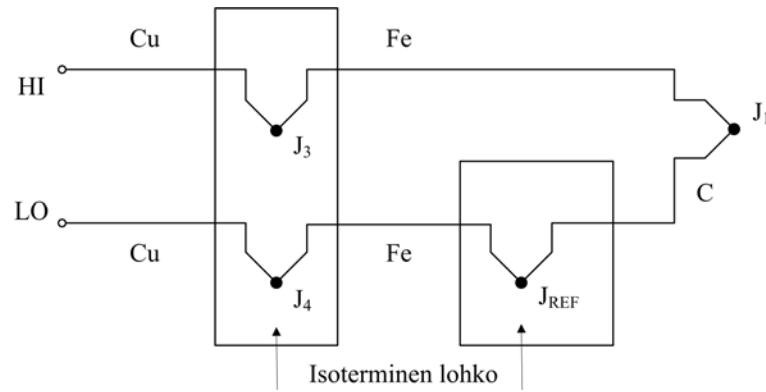
$$t_{J_1}(K) = T_{J_1}(^{\circ}C) + 273,15 \quad (54)$$

$$V = V_1 - V_2 = \alpha[(T_{J_1} + 273,15) - (T_{J_2} + 273,15)]$$

$$\begin{aligned}
&= \alpha(T_{J_1} - T_{J_2}) = (T_{J_1} - 0) \\
&= \alpha T_{J_1}
\end{aligned} \tag{55}$$

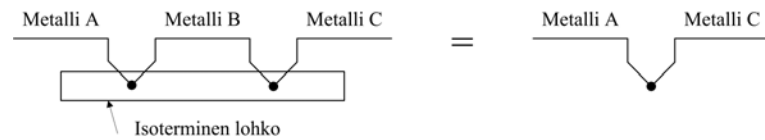
Jännitemittarin lukema vastaa nyt mitattavan lämpötilan ja 0 °C lämpötilaeroa. Yhtälöstä (55) nähdään, että termopareilla mittaaminen ei ole sidottu Celsius-asteikkoon, vaan yhtälöt voidaan kirjoittaa myös absoluuttiselle lämpötila-asteikolle.

Kaikissa termoparityypeissä toinen metalli ei ole kupari (kuva 9). Tällöin mittaus toimii edelleen, koska jännitemittarin terminaleissa  $J_3$  ja  $J_4$  olevien liitosten termojännitteiden napaisuus on vastakkainen. Tällöin terminaalien termojännitteiden summa on nolla, kunhan molemmat terminaalit ovat samassa lämpötilassa. Käytännössä tämä on parasta varmistaa tuomalla metalliliitokset erilliseen isotermiseen lohkokoon. Kuvan 9 tapauksessa käytetään yleistä J-tyypin, rauta-konstantaani, termoparia. Lisäksi on käytetty ylimääräisiä kuparijohtimia jännitemittarin terminaalien sekä termoparin kiinnityskohdan välillä. Piirissä on edelleen säilytetty erillinen referenssiliitos  $J_{ref}$ .



Kuva 9: Isotermien lohko kupari-rauta- liitoksissa

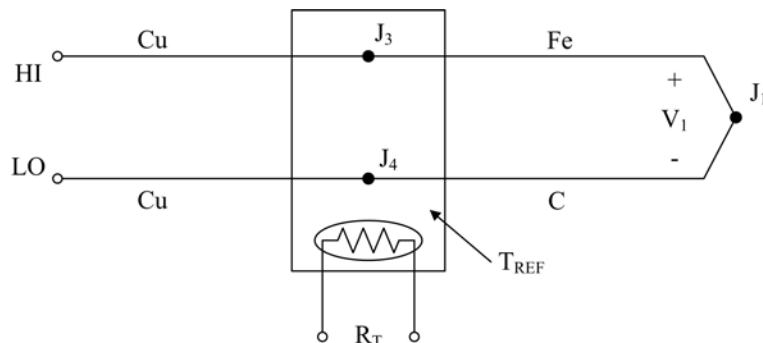
Kuvan 9 tapauksessa piirissä on kaksi erillistä isotermistä lohkoa. Käytännössä halutaan päästä eroon ylimääräisestä rautajohtimesta liitosten  $J_4$  ja  $J_{ref}$  välillä. Yhdistämällä erilliset isotermiset lohkot saadaan liitokset  $J_3$ ,  $J_4$  ja  $J_{ref}$  samaan lämpötilaan. Termoparien peruslaeista *Law of Intermediate Metals* tarjoaa ratkaisun ylimääräisen rautajohtimen ongelmaan. Kuvasta 10 nähdään, kuinka molemmista päistään samaan isotermiseen lohkokoon liittyvä johdin voidaan poistaa. [2]



Kuva 10: Law of Intermediate Metals

Lopullinen mittauskytkentä on esitelty kuvassa 11. Mittaamalla referenssiliitoksena toimivan isotermisen lohkon lämpötila  $T_{REF}$ , voidaan määrittää mitattavan liitoksen

$J_1$  lämpötila. Käytännön mittalaitteissa on erilaisia tapoja toteuttaa ohjelmallinen kompensointi, joka ottaa huomioon referenssiliitoksen vaikutuksen ja termoparin herkkyyden epälineaarisuuden. Kappaleessa 5.2.3 on käsitelty yksi tapa muuntaa saatu jännite lämpötilaksi.



Kuva 11: Mittalaitteen kytkentä käytännön mittauspiirissä

### 5.2.2 Erilaisia termoparityyppejä

Erilaisia metalleja yhdistämällä saadaan muodostettua laaja joukko termopareja. Mittauskohteilla on erilaisia vaatimuksia, joten tietyt termoparityypit on kehitetty esimerkiksi korkeiden lämpötilojen mittaamiseen. Kappaleessa esitellään yleisesti käytössä olevia termoparityyppejä ja niiden ominaisuuksia.

Taulukossa 8 esitellyistä termoparityypeistä B-, R- ja S- tyypit ovat jalometallitermopareja, ja niiden ominaisuudet muistuttavat toisiaan. Platinasta tehdyt termoparit ovat tarkkuudeltaan hyvin vakaita. Taulukon 8 viimeisessä sarakkeessa on annettu NIST:n (National Institute of Standards and Technology) määrittelemät rajat termoparien mittaalueille. [1]

B-tyypin termoparin erikoisuus on sen termojännitteen käyrämuoto, jolloin välillä 0-42 °C termojännite on sama kahdessa pisteessä kuvan 12 mukaisesti. Tätä ominaisuutta voidaan käyttää etuna mitattaessa korkeita lämpötiloja, sillä referenssiliitoksen lämpötilanmuutokset aiheuttavat lähes merkityksettömän pienen jännitteenvaihtelun välillä 0-40 °C.

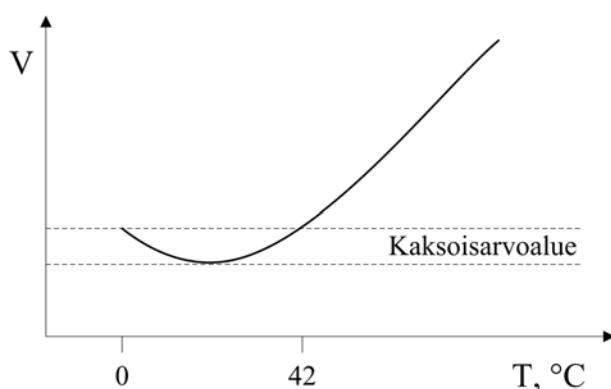
Epäjalojen metallien muodostamien termoparien kemiallista rakennetta ei ole määriteltä tarkasti. Eri tyyppisille termopareille on vain määriteltä taulukon 9 mukaiset rajat, joiden mukaisesti valmistetun termoparin tulee käyttäytyä. Valmistajat myyvät termopareja standari- sekä erikoislaatuina.

E-tyypin termopari soveltuu käytettäväksi matalissa lämpötiloissa sen korkean herkkyyksensä ansiosta. Tämä tyyppi soveltuu hyvin pienien lämpötilamuutosten havaitsemiseen.

J-tyypin termoparin haittana on toisena termoparimetallina olevan raudan epäpuhtaudet. Rautaa valmistetaan harvoin täysin puhtaana, jolloin myös J-tyypin ter-

Taulukko 8: Erilaisia termoparityyppejä ja niiden ominaisuuksia [1]

| Tyyppi | Metallit                  |                          | Seebeck- kerroin     |                | NIST rajat<br>(°C) |
|--------|---------------------------|--------------------------|----------------------|----------------|--------------------|
|        | +                         | -                        | $S(\mu V/^{\circ}C)$ | $T(^{\circ}C)$ |                    |
| B      | Platina -<br>30 % Rhodium | Platina -<br>6 % Rhodium | 5,96                 | 600            | 0 - 1820           |
| E      | Nikkeli -<br>10 % Kromi   | Konstantaani             | 58,67                | 0              | -270 - 1000        |
| J      | Rauta                     | Konstantaani             | 50,38                | 0              | -210 - 1200        |
| K      | Nikkeli -<br>10 % Kromi   | Nikkeli                  | 39,45                | 0              | -270 - 1372        |
| N      | Nikrosil                  | Nisil                    | 25,93                | 0              | -270 - 1300        |
| R      | Platina -<br>13 % Rhodium | Platina                  | 11,36                | 600            | -50 - 1768         |
| S      | Platina -<br>10 % Rhodium | Platina                  | 10,21                | 600            | -50 - 1768         |
| T      | Kupari                    | Konstantaani             | 38,75                | 0              | -270 - 400         |



Kuva 12: B- tyyppin termoparin kaksoisarvoalue

moparin ominaisuudet eivät säily yhdenmukaisina. J-tyypin termoparin etuja ovat korkea herkkyyskerroin sekä edullinen hinta.

K-tyypin termopari on suosittu sen laajan lämpötila-alueen ansiosta. Sen rakenne on myös hyvin hapettumista kestävä ja soveltuukin käytettäväksi kosteissa olosuhteissa. K-tyypin herkkyyskerroin on pienempi kuin J-tyypin. [2]

### 5.2.3 Jännitemittauksen muunnos lämpötilaksi

Termoparin tuottama termojännite täytyy mittalaitteessa tulkita lämpötilaeroksi referenssipisteen ja mittauspisteen välillä. Termoparien herkkyys poikkeavat kuitenkin toisistaan, ja samankin termoparin herkkyys vaihtelee riippuen mitattavas-



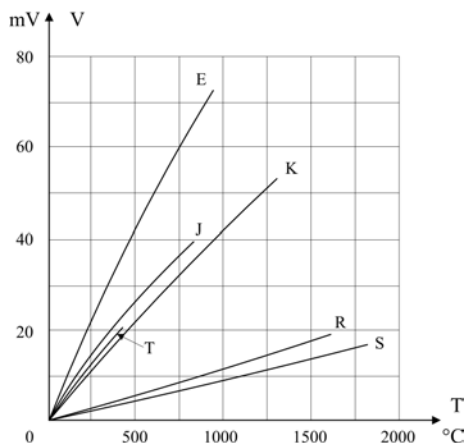
Taulukko 9: Standardinmukaiset termoparien tarkkuudet [1]

| Tyyppi | Termoparilangan virhe ( $^{\circ}\text{C}$ ) |                            |                           |
|--------|--|----------------------------|---------------------------|
|        | Lämpötila-alue                               | Standardilaatu             | Erikoislaatu              |
| B      | 870 - 1700 $^{\circ}\text{C}$                | $\pm 0,5\%$                | $\pm 0,25\%$              |
| E      | 0 - 900 $^{\circ}\text{C}$                   | $\pm 1,7$ tai $\pm 0,5\%$  | $\pm 1,0$ tai $\pm 0,4\%$ |
| J      | 0 - 750 $^{\circ}\text{C}$                   | $\pm 2,2$ tai $\pm 0,75\%$ | $\pm 1,1$ tai $\pm 0,4\%$ |
| K      | 0 - 1250 $^{\circ}\text{C}$                  | $\pm 2,2$ tai $\pm 0,75\%$ | $\pm 1,1$ tai $\pm 0,4\%$ |
| N      | 0 - 1250 $^{\circ}\text{C}$                  | $\pm 2,2$ tai $\pm 0,75\%$ | $\pm 1,1$ tai $\pm 0,4\%$ |
| R      | 0 - 1450 $^{\circ}\text{C}$                  | $\pm 1,5$ tai $\pm 0,25\%$ | $\pm 0,6$ tai $\pm 0,1\%$ |
| S      | 0 - 1450 $^{\circ}\text{C}$                  | $\pm 1,5$ tai $\pm 0,25\%$ | $\pm 0,6$ tai $\pm 0,1\%$ |
| T      | 0 - 350 $^{\circ}\text{C}$                   | $\pm 1,0$ tai $\pm 0,75\%$ | $\pm 0,5$ tai $\pm 0,4\%$ |

ta lämpötilasta. Jotta mittalaitteella voitaisiin mitata riittävän tarkasti suurella lämpötila-alueella, täytyy herkkyyksien riippuvuudet mallintaa ja huomioida mittalaitteen sisäisessä laskennassa.

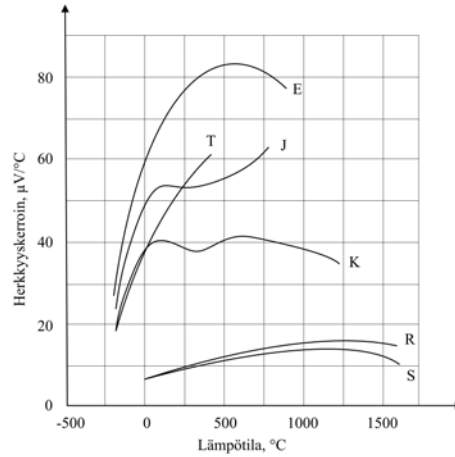
Kuvassa 13 näytetään eri termoparityyppien muodostama termojännite lämpötilan funktiona. Mitä suurempi mitattava jännite on, sitä huonommalla mittalaitteella pystytään suorittamaan mittauksia. Matalan termojännitteen termoparit ovatkin suunnattu hyvin korkeiden lämpötilojen mittaamiseen.

Kuvasta 14 nähdään, kuinka vahvasti epälineaarinen termoparin herkkyyden lämpötilakäyttäytyminen on. Käytännön mittalaitteiden toiminnan kannalta onkin välttämätöntä käyttää ennalta määrättyjä taulukoita, joista tietyn lämpötilan herkkyyslukema luetaan. [1]



Kuva 13: Erilaisten termoparien termojännite lämpötilan funktiona

Jos laskennassa käytettäisiin vain yhtä herkkyyttä termoparityyppiä kohden, rajoittuisi mittausjärjestelmän tarkkuus vain sille alueelle, jolla kyseinen herkkyys on



Kuva 14: Eri termoparien herkkyys ja termojännite lämpötilan funktiona

voimassa. Eri termoparityyppien herkkyydet on määritelty ja luetteloitu NIST:n (National Institute of Standards and Technology) taulukoissa [16]. Näiden taulukoiden tallentaminen sellaisenaan mittalaitteen muistiin ei ole kannattavaa, vaan pistejoukkoa kannattaa ennemmin kuvata funktiolla.

Tässä työssä käytetyssä mittalaitteessa termoparin lämpötila-alue jaetaan kahdeksaan osaan, joista jokaiselle sovitetaan oma alemman asteen polynomi sen sijaan, että koko pistejoukkoon yritettäisiin sovittaa yksi korkeamman asteen polynomi. Käyttämällä alemman asteen polynomeja nopeutetaan laitteen sisäistä laskentaa.

### 5.3 Lämpenemä ja sen laskeminen

Komponentissa syntyvät tehohäviöt nostavat sen lämpötilaa ympäristöön verrattuna. Lämpenemätesteissä laitteeseen saadaan muodostettua sähköisesti stabiili tila, jonka jälkeen komponentit lämpenevät oman aikavakionsa mukaisesti johonkin loppulämpötilaan. Vaikka komponentti olisi saavuttanut loppulämpenemäänsä saattaa sen lämpötila edelleen muuttua sitä jäähdyttävän ilmanlämpötilan muuttuessa. Näin tapahtuu jäähdytyspiirissä, jossa komponentit jäähtyvät jäähdytyskierron aikaisempien komponenttien lämmittämällä ilmalla.

Käytännön tapauksessa olisi hyödyllistä tietää pelkän aikavakion perusteella, miten pitkään komponenttia tulee kuormittaa, jotta saavutetaan pysyvän tilan loppulämpenemä.

Jos komponentin lämpötila on  $\Theta$  ja jäähdyttävän väliaineen lämpötila  $\Theta_a$ , määritellään niiden välinen lämpötilaero eli lämpenemä  $\theta$  yhtälön (56) mukaisesti.

$$\theta = \Theta - \Theta_a \quad (56)$$

Oletetaan ideaalinen tapaus, eli homogeeninen kappale, vakiohäviöteho  $P_d$  ja vakio-

lämpötila kappaleen sisällä. Pienen aikavälin energiatase  $P_d dt$  on tällöin

$$\text{syntyvä lämpö} = \text{varastoitunut lämpö} + \text{poistuva lämpö}$$

yhtälön (57) mukaisesti. [12]

$$P_d dt = C_{th} d\theta + \frac{1}{R_{th}} \theta dt, \quad (57)$$

missä  $dt$  on differentiaallinen aikaväli,  
 $C_{th}$  on kappaleen lämpökapasiteetti,  
 $R_{th}$  on lämpöresistanssi kappaleesta jäähdyttävään väliaineeseen,  
 $d\theta$  on lämpenemän differentiaallinen muutos.

Energiataseesta saadaan lämpenemän differentiaaliyhtälö

$$P_d = C_{th} \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{R_{th}} \theta. \quad (58)$$

Jos lämpenemän alkutila on  $\theta_0$  ja kappaleesta syntyy vakiohäviöteho  $P_d$  hetkestä  $t = 0$  alkaen, saadaan ratkaisuksi

$$\theta = \theta_0 + (\theta_\infty - \theta_0)(1 - e^{-t/\tau}). \quad (59)$$

Yhtälön (59) lämpenemä lähestyy pysyvän tilan ( $t = \infty$ ) lämpenemää  $\theta_\infty$  eksponentiaalisesti aikavakiolla  $\tau$ .

$$\theta_\infty = R_{th} P_d \quad (60)$$

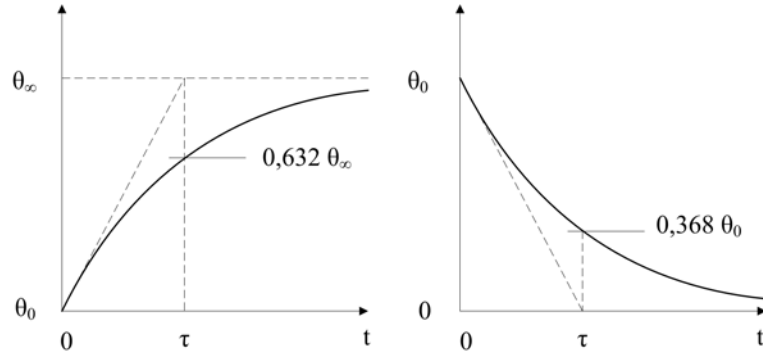
$$\tau = R_{th} C_{th} \quad (61)$$

Jäähtymiseen pätee, alkuehdoilla ajanhetki  $t = 0$ , alkulämpötila  $\theta_0$  ja häviöteho  $P_d = 0$ , yhtälö (62).

$$\theta = \theta_0 e^{-t/\tau} \quad (62)$$

Testaustilanteessa saavutettavat loppulämpötilat eivät kuitenkaan aina vastaa todellista loppulämpenemää. Seuraavaksi esitetään vaihtoehtoinen määritelmä lämpötilojen tasaantumiselle sekä arvioidaan sen aiheuttamaa virhettä verrattuna ideaalitulanteeseen.

Määritetään ajanhetki  $t_h$  nykyhetkeksi, jolloin komponentin lämpötila 30 minuuttia sitten on  $t_{h-30min}$ . Määritetään lisäksi lämpötilat  $T_h$ ,  $T_{h-30min}$  sekä  $T_\infty$ . Kaksi ensimmäistä lämpötilaa ovat edellä määritettyjen ajanhetkien lämpötilat ja viimeinen komponentin loppulämpötila. Lämpötilojen tasaantumiseen käytetään käytännön



Kuva 15: Lämpenemis- ja jäähtymiskäyrät ideaalisessa tapauksessa

testitilanteissa erilaisia määritelmiä. Tämän työn mittauksissa lämpötilat on oletettu tasaantuneiksi kun hitaimman aikavakion komponentin lämpötila muuttuu alle  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  30 minuutissa. Yhtälössä (66) on ratkaistu ajanhetki  $t_h$  kokonaislämpenemän  $T_{\infty} - T_0$  ja aikavakion  $\tau$  funktiona. Nähdään, että molempien muuttujien kasvattaminen pidentää testin kestoa. Toisaalta jos sama komponentti lämpenee erilaisissa olosuhteissa eri lämpenemään, muuttuu myös loppulämpenemän virhe.  $T_{virhe}$  on ideaalitilanteen loppulämpenemän ja esitellyllä menetelmällä saatavan loppulämpenemän erotus.

$$T_h - T_{h-30min} = 0,5^{\circ}\text{C} \quad (63)$$

$$T_h = T_0 + (T_{\infty} - T_0)(1 - e^{-t_h/\tau}) \quad (64)$$

$$T_{h-30min} = T_0 + (T_{\infty} - T_0)(1 - e^{-(t_h-30min)/\tau}) \quad (65)$$

$$t_h = -\tau \ln \left( \frac{0,5}{(T_{\infty} - T_0)(e^{\frac{1800}{\tau}} - 1)} \right) \quad (66)$$

$$T_{virhe} = T_{\infty} - T_h \quad (67)$$

Yleisesti pisimmät aikavakiot ovat komponenteilla, joiden massa ja tilavuus on suuri. Taulukkoon 10 on koostettu tyypillisiä komponentteja, joiden lämpenemän tasaantumista joudutaan odottamaan laitteessa pisimpään. Tämän työn mittauksissa käytetyn laitteen pisimmän aikavakion komponentteja ovat tasajännitevälipiirin kondensaattorit. Taulukossa 10 ensimmäinen rivi on saatu testattavan ACS350-laitteen välipiirin kondensaattoreista. Toinen ja neljäs rivi on saatu suuresta n. 2 MW LCL-suodattimesta sekä kolmas rivi pienemmästä n. 450 kW tulokuristimesta. Aikavakiot on määritetty kuvan 15 mukaisesti graafisesti lämpenemätestien tuloksista.

Tuloksista nähdään, että pienien lämpenemätestilaitteiden kanssa käytetystä yksinkertaistuksesta ei aiheudu merkittävää virhettä lämpenemätestien tuloksiin. Suurempien komponenttien testituloksiin aiheutuva virhe on jo merkittävä. Näitä komponentteja mitattaessa täytyy tuloksiin lisätä yhtälön 67 mukainen virhe. Luotettavat tulokset saadaan kuitenkin jatkamalla mittauksia lämpötilojen todelliseen tasaantumiseen asti.

Taulukko 10: Erilaisten komponenttien lämpenemävirheet

| Komponentti           | Aikavakio<br>$\tau$ | Lämpenemä<br>$T_{\infty} - T_0$ | Lämpenemisaika<br>$t_h$ | Virhe<br>$T_{virhe}$ |
|-----------------------|---------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Kondensaattori, pieni | 15 min              | 20 K                            | 1h 20min                | 0,06                 |
| Kondensaattori, suuri | 180 min             | 50 K                            | 8h 40min                | 2,76                 |
| Kurisin, pieni        | 20 min              | 70 K                            | 2h 05min                | 0,14                 |
| Kuristin, suuri       | 95 min              | 120 K                           | 7h 05min                | 1,35                 |

Aikaisemmin esitellyssä tarkastelussa on luotu riippuvuus komponentin lämpenemän, aikavakion sekä testin keston välille. Tarkastelu voidaan tehdä myös käänteiseen suuntaan, jolloin testin keston ja loppulämpötilan perusteella voidaan arvioida suoraan testattavan komponentin aikavakiota sekä testaustavan virhettä.

## 6 Lämpötilanmittauksen mittausepävarmuuden määrittäminen

Tässä kappaleessa määritetään mittausepävarmuus mittauksissa käytettävälle lämpötilanmittauslaitteistolle. Kappaleessa 6.1 esitellään ensin yleinen tapa mittausjärjestelmän mittausepävarmuuden määrittämiseksi. Kappaleessa 6.2 epävarmuuskomponentit käsitellään yksitellen, ja yhdistetään koko mittausjärjestelmän epävarmuusanalyysiksi kappaleessa 6.2.5.

### 6.1 Teoreettinen tapa mittausepävarmuuden määrittämiseksi

Mittausepävarmuus on jokaiseen käytännön mittaukseen liitettävä parametri, jonka arvo mittautulosten arvioinnissa on vähintään yhtä tärkeä kuin itse mitattu tulos. Mittausepävarmuutta määriteltäessä lähtösuure  $Y$  on aina funktio tulosuureista  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, X_n$ )

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (68)$$

Yleensä funktio  $f$  voidaan kirjoittaa analyttisenä yhtälönä, mutta joskus kaikkien termien kirjoittaminen samaan yhtälöön on hankalaa. Funktio  $f$  voidaan määrittää myös kokeellisesti tai simuloimalla, ja myös yhdistelmät edellisistä ovat mahdollisia.

Tulosuureet  $X_i$  voidaan jakaa kahteen pääluokkaan. Ensimmäisessä luokassa ovat suureet, jotka määritetään suoraan käynnissä olevasta mittauksesta. Nämä arvot voidaan saada yksittäisestä mittauksesta, toistokokeesta tai kokemukseen perustuvasta tiedosta. Toisessa luokassa ovat suureet, jotka tuodaan ulkoisista lähteistä kuten standardeista tai käsikirjoista. [4]

Itse standardimittausepävarmuuden määrittämiseen on kaksi erityyppistä tapaa. Tyypin A:ssa mittausaineistolle tehdään tilastollinen analyysi, ja tässä tapauksessa standardimittausepävarmuus määritetään mittautulosten keskiarvon keskihajonnan avulla. Tyypin B standardimittausepävarmuutta määritettäessä ei käytetä apuna tilastotietoa, vaan epävarmuus arvioidaan muilla tieteellisillä keinoilla.

Tyypin A standardimittausepävarmuus määritetään toistamalla mittauksia samoissa olosuhteissa useita kertoja. Toistokokeella mitatut tulosuureet  $X_i$  muodostavat joukon  $Q$ . Toistojen lukumäärän ollessa  $n$  ( $n > 1$ ), ja mittauksien ollessa tilastollisesti itsenäisiä, joukolle  $Q$  saadaan määritettyä estimaatti yksittäisten mittautulosten aritmeettisena keskiarvona  $\bar{q}$  yhtälön (69) mukaisesti.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (69)$$

missä  $q_j$  on yksittäinen toistokokeen mittautulos.

Kun toistokokeen toistojen määrä  $n$  on yli kymmenen, voidaan joukolle  $Q$  laskea tilastollisesti luotettava kokeellinen varianssi  $s^2(q)$  yhtälön (70) mukaisesti. Standardimittausepävarmuuden määrittämiseksi lasketaan ensin keskiarvon  $\bar{q}$  varianssi  $s^2(\bar{q})$ . Standardimittausepävarmuus  $u(\bar{q})$  määritellään toistokokeen kokeellisena keskiarvon keskihajontana  $s(\bar{q})$  yhtälön (72) mukaisesti.

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (70)$$

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (71)$$

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (72)$$

Jos todennäköisyysjakaumalle voidaan määrittää vain ylemmät ja alemmat rajat  $a_+$  ja  $a_-$ , oletetaan jakauma suorakaidejakaumaksi ja epävarmuus määritetään tyypin B mukaisesti. Lähteestä [4] saadaan yhtälöt suorakaidejakauman estimaatille  $x_i$  ja standardimittausepävarmuudelle  $u(x_i)$ .

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (73)$$

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2} \quad (74)$$

Usein ylemmän  $a_+$  ja alemman  $a_-$  rajan arvojen itseisarvot ovat samansuuruiset, jolloin niiden erotus voidaan kirjoittaa muodossa  $2a$ . Tällöin standardimittausepävarmuudeksi  $u(x_i)$  saadaan

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (75)$$

Kun eri epävarmuuskomponentit tunnetaan ja niille on laskettu standardiepävarmuudet, koostetaan kaikki termit epävarmuusanalyysiksi taulukon 11 mukaisesti, jossa määritetään komponenttien estimaatti, standardimittausepävarmuus, herkkyyskerroin sekä standardimittausepävarmuus herkkyyskerroin huomioituna.

Laskettaessa lähtöestimaatin standardimittausepävarmuuskomponentteja  $u_i(y)$  huomioidaan herkkyyskerroin  $c_i$  yhtälön (76) mukaisesti.

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (76)$$

Standardimittausepävarmuus  $u(y)$  saadaan määritettyä yhtälön (77) mukaisesti oletuksella, etteivät tulosuureet  $X_i$  korreloi keskenään.

Taulukko 11: Esimerkki mittausepävarmuuden epävarmuusanalyysistä

| Suure    | Estimaatti | Standardi-<br>mittausepävarmuus | Herkkyys-<br>kerroin | Muokattu<br>mittausepävarmuus |
|----------|------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| $X_i$    | $x_i$      | $u(x_i)$                        | $c_i$                | $u_i(y)$                      |
| $X_1$    | $x_1$      | $u(x_1)$                        | $c_1$                | $u_1(y)$                      |
| $X_2$    | $x_2$      | $u(x_2)$                        | $c_2$                | $u_2(y)$                      |
| $\vdots$ | $\vdots$   | $\vdots$                        | $\vdots$             | $\vdots$                      |
| $X_n$    | $x_n$      | $u(x_n)$                        | $c_n$                | $u_n(y)$                      |
| $Y$      | $y$        |                                 |                      | $u(y)$                        |

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n u_i^2(y) \quad (77)$$

Standardimittausepävarmuudesta päästään laajennettuun mittausepävarmuuteen  $U$  huomioimalla kattavuuskerroin  $k$  yhtälön (78) mukaisesti.

$$U = ku(y) \quad (78)$$

Tapauksissa, joissa mitattavan suureen voidaan olettaa olevan normaalijakautunut ja lähtöestimaatin standardimittausepävarmuuden määrittelyn ollessa luotettava, voidaan käyttää standardia kattavuuskerrointa  $k = 2$ . Tällä kertoimella saavutetaan 95%:n peittotodennäköisyys. Myös tämän työn mittausepävarmuuden määrittelyssä käytetään edellä mainittua peittokerrointa.

Kun laajennettu mittausepävarmuus on määritetty, ilmoitetaan tulos muodossa  $(y \pm U)$ .

## 6.2 Testilaitteiston lämpötilan mittausepävarmuuden määrittäminen

Työn lämpötilanmittauslaitteisto koostuu Agilentin mittalaitteesta, ja termoparilangasta valmistetuista termoantureista. Mittalaite sisältää sisäisen referenssiliitoksen kompensoinnin, joka on huomioitu mittalaitteen epävarmuuskomponentissa. Termoparin virhe on jaettu termoparilangasta ja anturin kiinnityksestä aiheutuviin komponentteihin. Muita termoparimenetelmän epävarmuuksia on esitelty kappaleessa 6.2.4.



### 6.2.1 Termoparin tarkkuus

Termoparin tarkkuus määritetään valmistajan antaman tiedon mukaisesti ja lisätään koko mittausjärjestelmän epävarmuusanalyysiin, jonka avulla koko järjestelmän mitausepävarmuus määritetään. Käytetty termopari on Watlow Gordonin J30-2-305-IEC. Termopari on erikoislaatuinen, ja sen datalehti on esitelty liitteessä C.

Termoparilangasta aiheutuva virhe on  $\pm 1,1$  °C tai 0,4 % lukemasta, riippuen siitä, kumpi on suurempi. Näin alle 275 °C lämpötiloissa virhe on aina sama,  $\pm 1,1$  °C. Tämän epävarmuustekijän standardimittausepävarmuus määritetään tyypin B mukaisesti.

Termoparilangalle saadaan estimaatti  $x_2$  ja standardiepävarmuus  $u(x_2)$  yhtälöiden (73) ja (75) mukaisesti.

$$x_2 = \frac{1}{2}(1, 1 + (-1, 1)) \quad (79)$$

$$u(x_2) = \frac{1,1}{\sqrt{3}} \quad (80)$$

Vastuslangan mittaustuloksen estimaatti on  $x_2 = 0$  °C, ja standardimittausepävarmuus  $u(x_2) = 0,635$  °C.

### 6.2.2 Mittalaitteen tarkkuus

Myös mittalaitteen tarkkuus määritetään valmistajan antaman tiedon perusteella. Mittalaitteena käytettiin Agilent 34970- laitetta ja Agilent 34901- kanavamultiplekseriä. Mittalaitteen datalehti on esitelty liitteessä C.

Tyypin J termoparilla tehtävissä mittauksissa mittalaitteen virhe on  $\pm 1,0$  °C. Lasketaan mittalaitteelle tyypin B mukainen estimaatti  $x_3$  ja standardimittausepävarmuus  $u(x_3)$ .

$$x_3 = \frac{1}{2}(1, 0 + (-1, 0)) \quad (81)$$

$$u(x_3) = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (82)$$

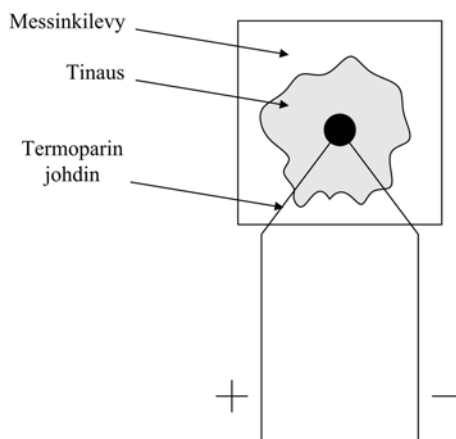
Mittalaitteen mittaustuloksen estimaatti on  $x_3 = 0$  °C, ja standardimittausepävarmuus  $u(x_3) = 0,577$  °C.

### 6.2.3 Termoparin kiinnityksen tarkkuus

Termoparin pintakiinnityksen voi toteuttaa monilla erilaisilla tavoilla. Usein termopari täytyy myös eristää sähköisesti mitattavasta pinnasta, jotta lämpötilaa voidaan

mitata turvallisesti. Mitattavan pinnan materiaali sekä ulkoiset mitat vaihtelevat, ja asettavat käytettävälle termopari kiinnitykselle vaatimuksia.

Termoparilankojen juottaminen kiinni messinkilevyyn luo mittaussiirimeen kaksi uutta liittosta, kuva 16. Kun liittokset ovat samassa lämpötilassa on tilanne kuvan 10 mukainen, ja tinan vaikutus kumoutuu. Tekemällä selkeästi kaksi uutta liittosta siten, että yhteen kierretyn termoparin langat menevät tinan sisään erillään, on turvallisempi tapa inhimillisten erehdyksen välttämiseksi. Esimerkkinä, jos varsinainen liitos jää tinan ulkopuolelle, mittaa termopari ilmanlämpötilaa aivan messinkilevyn vierestä. Tällöin mittausvirhe voi muodostua huomattavaksi.



Kuva 16: Termoparien kiinnitys messinkilevyyn tinaamalla

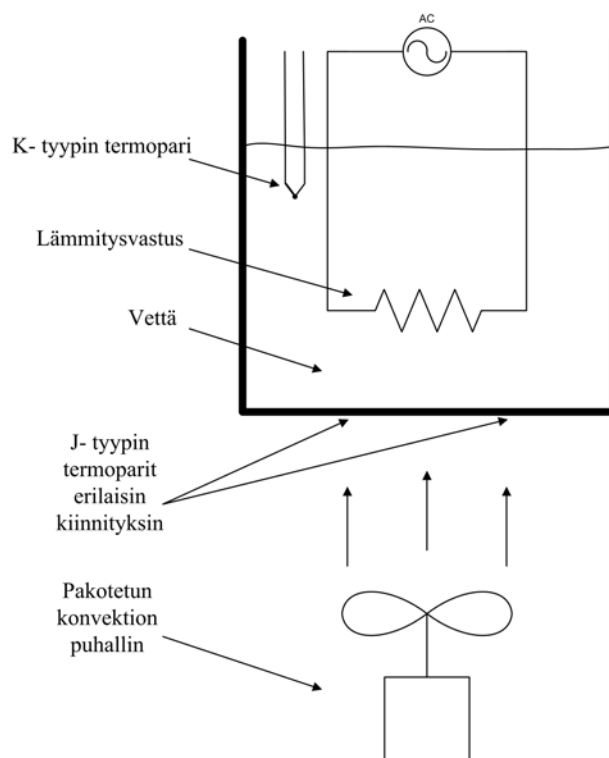
Kuvassa 17 on esitelty termoparin kiinnityksen mittauserävarmuuden määrittämiseen käytetty testausjärjestely. Vettä lämmitettiin upotettavan vastuksen avulla alumiinikattilassa, jonka pohjaan oli kiinnitetty termopareja pintaliitoksilla. Lisäksi kattilan pohjan sisään oli porattu termopareja kuvan 19 mukaisesti. Kaikki kattilan pohjaan asennettavat anturit olivat J-tyyppisiä, jotka oli valmistettu kuvan 16 mukaisesti.

Pintaan asennettavat termoparit kiinnitettiin samalle etäisyydelle astian keskipisteestä. Näin varmistettiin, että kaikkien anturien sijainti on ilmankierron kannalta toisiaan vastaava. Kaikki erilaiset kiinnitystavat valmistettiin kolmena kappaleena, ja astian pohjasta löytyy kolme identtistä 120 asteen kaistaletta. Erilaisia pintakiinnityksiä testattiin kahdeksan kombinaatiota sekä yksi kiinnityskombinaatio kattilan pohjan sisällä (kuva 19).

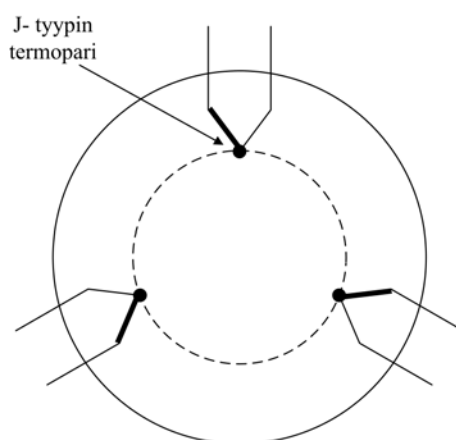
Erilaiset messinkilevyjen kiinnityskombinaatiot on esitelty taulukossa 12.

Seuraavissa mittauksissa todetaan ensin termoparien tarkkuus tapauksessa, jossa pinta ei pääse jäähtymään luonnollisesti. Tilanne on muodostettu eristämällä kattilan pohja vaahtomuovilla, jolloin ilma ei pääse vaihtumaan.

Tämän jälkeen esitellään erilaisten käytettyjen kiinnitystapojen aiheuttamia lämpötilaeroja luonnollisella sekä pakotetulla konvektiolla. Luonnollinen konvektio saa-



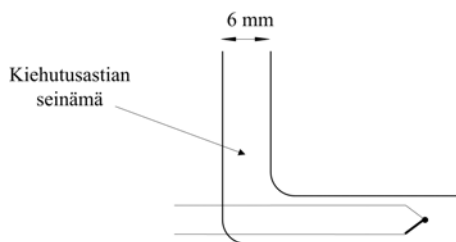
Kuva 17: Kiinnitystarkkuuden testauskytkentä



Kuva 18: Termoparien kiinnitys ympyränkaarelle astian pohjassa

daan poistamalla kattilan pohjasta mekaaninen eriste. Pakotettu konvektio on muodostettu kuvan 17 mukaista puhallinta käyttämällä.

Luonnollisella konvektiolla mitattava pinta säilyy veden kiehumispisteessä, ja optimaalinen kiinnitystapa mittaa mahdollisimman lähelle kiehumispistettä. Pakotetulla konvektiolla mitattavaan pintaan aiheutuu lämpötilagradientti, jolloin mitattava lämpötila ei enää ole 100 °C. Tällöin optimaalinen kiinnitys käyttäytyy kuten mi-



Kuva 19: Termoparien poraus pinnan sisään

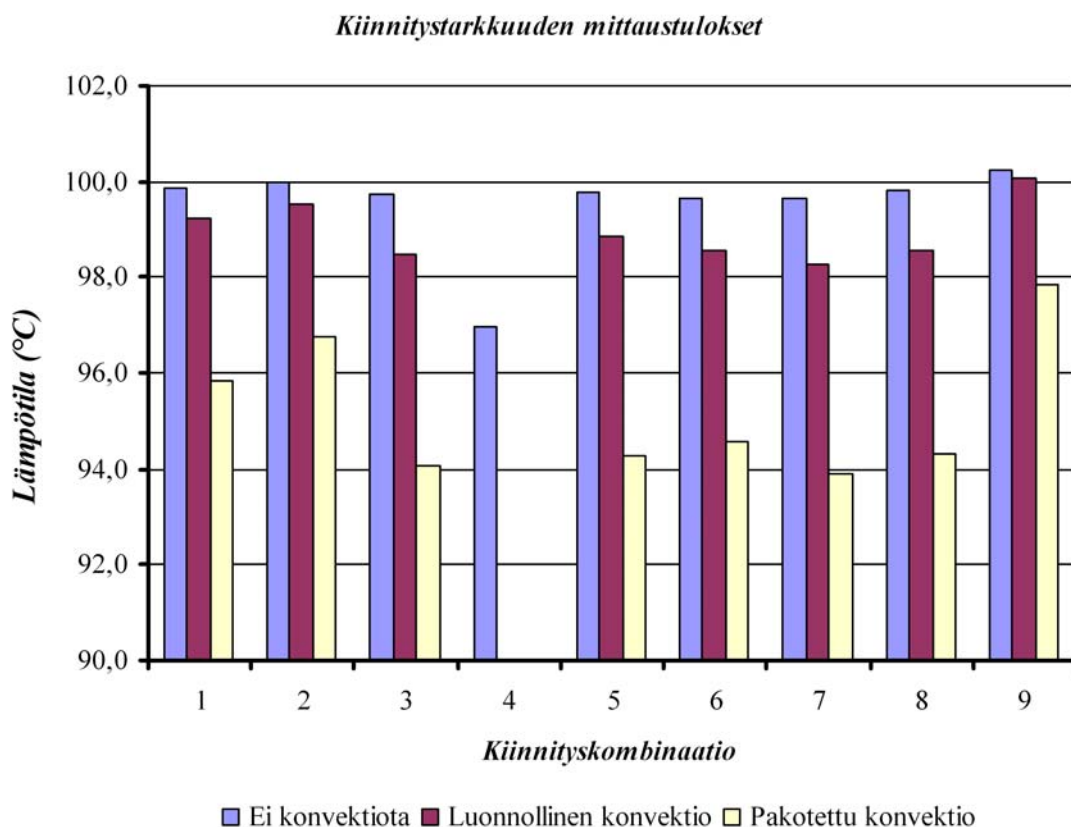
Taulukko 12: Kiinnitystarkkuuden erilaiset kombinaatiot

| Kombinaatio | Selite   |
|-------------|--|
| 1           | Kiinnitys pikaliimalla ilman eristettä   |
| 2           | Kiinnitys pikaliimalla pintaan,<br>Päällä kerros X60- ainetta  |
| 3           | Jänniteteippi pinnan ja messinkilevyn välissä,<br>Päällä kerros X60- ainetta                         |
| 4           | Jänniteteippi pinnan ja messinkilevyn välissä  |
| 5           | Capton-teippi pinnan ja messinkilevyn välissä  |
| 6           | Capton-teippi pinnan ja messinkilevyn välissä,<br>Päällä kerros X60- ainetta                         |
| 7           | Mikaniittilevy pinnan ja messinkilevyn välissä,<br>Päällä kerros X60- ainetta                        |
| 8           | Jänniteteippi pinnan ja messinkilevyn välissä<br>Päällä kerros pikaliimaa, kivetetty aktivaattorilla |
| 9           | Anturi kattilan pohjan sisällä   |

tattava pinta, eli mittausanturin kiinnityksestä aiheutuva lämpötilagradientti ei saa poiketa pinnan normaaleista ominaisuuksista. Pakotetun konvektion tapauksessa optimaalisin anturi on pinnan sisällä sijaitseva.

Tulokset on esitelty kuvassa 20. Nähdään, että termopari mittaa optimaalisesti pintaan liitettyinä lämpötiloja hyvinkin tarkasti. Erotus huonoimman ja parhaimman kiinnitystavan välillä on  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Luonnollisella konvektiolla erot suurenevät. Parhaan ja huonoimman kiinnityksen erotus on nyt  $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tulosten tarkastelussa on jätetty huomiotta kiinnityskombinaatio 4, joka ei sovellu mitattavalle lämpötilalle. Veden kiehumispisteessä kombinaation 4 sähköinen eriste hajosi mekaanisesti, jolloin anturi irtosi mitattavasta pinnasta. Pakotetun konvektion tapauksessa ero parhaimman ja huonoimman kiinnityksen välillä on  $3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tietyn kiinnityskombinaation tulos on saatu kolmen anturin keskiarvona.

Tuloksista huomataan, että pakotetun konvektion tapauksessa pintalämpötila ei ole enää sama pinnan eri puolilla. Toisella puolella lämpötila on tunnettu veden kiehu-



Kuva 20: Kiinnitystarkkuuden tulokset

mispiste, mutta todellisen mittauspinnan pintalämpötila on alhaisempi. Veden kiehumispisteen ja huonoimman kiinnityksen mittaaman lämpötilan erotus on  $6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mitattaessa lämpötilaa pakotetun konvektion piirissä, tulee mitattava piste suunnitella huolellisesti, jotta mitattava lämpötila on todella se, mitä halutaan mitata.

Yleisesti voidaan sanoa, että kiinnityksen sähköinen eristäminen huonontaa mittarin termistä kontaktia, ja pienentää mitattua lämpötilaa. X60-kaksikomponenttiliiman lisäys anturin päälle kasvattaa mittaustulosta pakotetun konvektion tapauksessa.

Kiinnitystarkkuuden epävarmuuskomponentille saatiin kolme erilaista arvoa. Epävarmuutta arvioidessa kaikki anturit oletettiin painoarvoltaan samansuuruisiksi, ja epävarmuudet on laskettu 21 anturin yhden mittauksen keskiarvona. Keskiarvossa ovat mukana taulukon 12 mukaiset kombinaatiot 1, 2, 3, 5, 6, 7 ja 8.

Ensimmäisessä mittauksessa pinta eristettiin mekaanisesti. Tällöin anturikiinnityksille saatiin yhtälön (69) mukainen toistokokeen keskiarvo  $\bar{q} = 99,79\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja keskiarvolle yhtälön (72) mukainen standardimittausepävarmuus  $u(\bar{q}) = 0,047\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Toisessa mittauksessa pinnan annettiin jäähtyä luonnollisesti. Tällöin anturikiinnityksille saatiin toistokokeen keskiarvo  $\bar{q} = 98,82\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja keskiarvolle standardimit-

tausepävarmuus  $u(\bar{q}) = 0,137\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Kolmannessa mittauksessa kuvan 17 mukainen puhallin kytkettiin päälle. Pakotetun konvektion tapauksessa anturikiinnityksille saatiin toistokokeen keskiarvo  $\bar{q} = 94,71\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja keskiarvolle standardimittausepävarmuus  $u(\bar{q}) = 0,297\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Nähdään, ettei kiinnitystarkkuudesta aiheudu suurta standarimittausepävarmuuskomponenttia koko mittauksen epävarmuusanalyysiin. Huomioitavaa on kuitenkin, että erilaisten kiinnitystapojen estimaatit poikkeavat huomattavasti toisistaan. Tällöin mittalaite näyttää luotettavasti sen lämpötilan, minkä anturi mittaa, mutta mitattava lämpötila ei olekaan yksitelitteisesti määritelty eikä välttämättä tavoiteltu.

Koko mittausjärjestelmän epävarmuusanalyysin määrittelyssä käytetään kiinnitystarkkuudesta pakotetun konvektion tapauksta, jonka estimaatiksi saatiin  $x_4 = 100 - 94,71 = -5,29\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja standardimittausepävarmuudeksi  $u(x_4) = 0,297\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 6.2.4 Muita epävarmuustekijöitä

Termopareilla mitattaessa on tärkeää kiinnittää huomiota käytettävän mittalaitteen erottamiseen mitattavan laitteen maadoituspotentiaalista. Jos mitattava kohde ja mittalaite ovat samassa maapotentiaalissa muodostuu termoparilangan kautta virran kulkureitti mitattavan kohteen maadoituspotentiaaliin. Tällöin mittalaitteeseen saattaa muodostua yhteismuotoisia häiriöitä, jotka huontavat mittauksia.

Termoparin jännite muodostuu lämpötilagradientista termoparilangoissa. Jännite ei muodostu pistemäisesti termopariliitoksessa, vaan jännitteen muodostumiseen vaikuttaa myös molempien lankojen lämpötila liitoksen välittömässä läheisyydessä. Tällöin on oleellista, ettei langassa ole heti termopariliitoksen jälkeen suurta lämpötilagradienttia.

Termoparilankojen juottaminen muodostaa piiriin uusia liitoksia, joiden vaikutukset kumoavat teoriassa toisensa. Käytännössä tämä on kuitenkin uusi epävarmuuskomponentti, koska juotusmateriaalin ominaisuudet vaihtelevat, eikä liitoksen laadusta ole takeita.

Mitattaessa pintoja, joiden läheisyydessä kulkee suuria virtoja, pyrkii termoparilankoihin indusoitumaan jännitteitä. Nämä jännitteet huonontavat saatavia mittauksia siten, että niiden keskihajonta kasvaa selkeästi. Lisätutkimuksella tulisi varmistaa, ettei indusoituvista jännitteistä aiheudu systemaattista virhettä lämpötilanmittauksiin.

#### 6.2.5 Tulokset

Tämän työn testeissä käytetyn lämpötilanmittauslaitteiston epävarmuusanalyysi on esitelty taulukossa 13. Kiinnitystarkkuuden epävarmuutena on käytetty pakotetun konvektion tapauksta.

Veden kiehumispisteen lämpötila vaihtelee ilmanpaineen mukaan. Paineen mittaa-

miseen ei ollut käytettävissä luotettavaa mittaria, joten ilmanpaineen vaikutus on huomioitu referenssilämpötilan epävarmuuskomponentissa. Seuraavaksi määritetään veden kiehumispisteelle tyypin B mukainen estimaatti ja standardimittausepävarmuus. Ilmanpaineen ollessa välillä 996-1031 mbar saadaan  $a_+ = a_- = 0,5$  °C. Tällöin veden kiehumispisteen estimaatiksi  $x_1$  saadaan 100,0 °C ja standardimittausepävarmuudeksi  $u(x_1) = 0,289$  °C. [18]

Taulukko 13: Mittausepävarmuuden epävarmuusanalyysi pakotetun konvektion tapauksessa

| Suure               | Estimaatti | Standardimittausepävarmuus | Herkkyyskerroin | Muokattu mittausepävarmuus |
|---------------------|------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| Referenssilämpötila | 100,0 °C   | 0,289 °C                   | 1,0             | 0,289 °C                   |
| Mittalaite          | 0,0 °C     | 0,577 °C                   | 1,0             | 0,577 °C                   |
| Termoparilanka      | 0,0 °C     | 0,635 °C                   | 1,0             | 0,635 °C                   |
| Anturin kiinnitys   | -5,29 °C   | 0,297 °C                   | 1,0             | 0,297 °C                   |
| $Y$                 | 94,71 °C   |                            |                 | 0,953 °C                   |

Mittausjärjestelmän estimaatiksi saatiin lämpötila 94,71 °C ja standardimittausepävarmuudeksi 0,953 °C.

Yhtälön (78) mukaisesti laajennetuksi mittausepävarmuudeksi saadaan  $U = \pm 1,9$  °C peittokertoimella  $k = 2$ .

Tuloksista nähdään, ettei termoparin kiinnityksestä aiheudu suuria mittausepävarmuuksia. Termoparin kiinnitys vaikuttaa kuitenkin siihen lämpötilaan, jota mitataan, jolloin pakotetun konvektion tapauksessa nähdään, ettei anturin kiinnityspiste ole enää kiehuvan veden lämpötilassa. Pinta on jäähtynyt matkalla vedestä anturille, ja käytettävät eristeet lisäävät termistä vastusta entisestään.

Todellisuudessa hyvin kalibroidulla termoparilla saadaan hyvinkin tarkkoja tuloksia. Tällöin suurimmat epävarmuuskomponentit pienenevät huomattavasti, koska mittausjärjestelmä voidaan kalibroida yksilöinä sekä suorittaa kalibroinnin mukaiset korjaukset saataviin mittaustuloksiin. Termoparin ominaisuudet muuttuvat vanhetessaan, jolloin uutena tehty kalibrointi ei enää päde. Termopari soveltuu parhaiten lyhytkestoisiin mittauksiin, jolloin termoparin vanhenemisesta ei aiheudu merkittävää virhettä mittaukseen.

## 7 Erilaisten verkko-olosuhteiden vaikutus laitteen häviöihin ja sisäisiin lämpötiloihin

Erilaiset syöttöverkon parametrit aiheuttavat vaihdellessaan muutoksia testattavan laitteen toimintaan. Kappaleessa käsitelty tapaukset ovat yleisiä, mutta niiden vaikutus testattavaan laitteeseen vaihtelee laitteen rakenteesta riippuen. Tässä työssä esitellyt mittaustulokset pätevät taajuusmuuttajaan joka on diodisyttöinen, ja jossa ei ole tulokuristinta syöttöpuolella eikä tasajännitevälipiirissä.

Ensimmäisenä esitellään käytetty testilaitteisto ja käytetyt mittalaitteet, jonka jälkeen käydään läpi erilaisia testituloksiin vaikuttavia asioita.

### 7.1 Testausjärjestelyt

Testeissä tutkittiin syöttöverkon vaikutusta ABB:n ACS350-taajuusmuuttajaan. Laitteen nimellisteho on 22 kilowattia ja suurin jatkuva lähtövirta 44 ampeeria. Laitteen valintaan vaikuttivat monet asiat, oli tärkeätä löytää laite, joka on helposti muokattavissa testikäyttöön. Lämpenemätestien toistamisen helpottamiseksi valittiin laite, jonka sisäiset aikavakiot ovat mahdollisimmat lyhyet. Työssä mitattiin erikseen tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan lämpötilat, ja valitussa laitteessa tulo- ja lähtösiltakytkennät sijaitsivat fyysisesti omilla komponenteillaan. Lämmön johtumisen kannalta tuloksia huonontaa se, että molemmat tehopuolijohdekomponentit sijaitsevat samalla jäähdytyselementillä. Tehopuolijohdeiden lisäksi haluttiin mitata lämpötilat myös tasajännitevälipiirin kondensaattoreista.

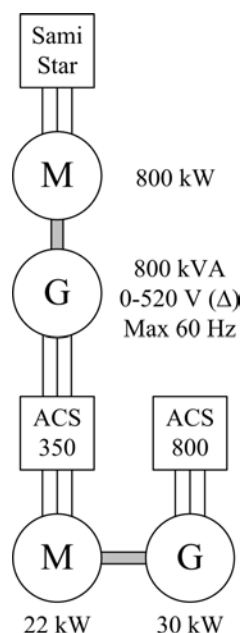
Lämpötilanmittaus suoritettiin kappaleessa 5.2 esitellyllä termoparimenetelmällä siten, että kondensaattorien lämpötila mitattiin pintalämpötilana. Anturit kiinnitettiin taulukossa 12 esitellyn kombinaation 3 mukaisesti. Tehopuolijohdeiden lämpötilat mitattiin puolijohdekomponentin ja jäähdytyselementin rajapintaan asennettavilla antureilla, joka sijoitettiin fyysisesti tehopuolijohdeiden kohdalle kuvan A1 mukaisesti. Anturit porattiin jäähdytyselementin läpi, jolloin aiheutettiin hieman epäideaalisuutta elementin jäähtymiseen.

Referenssinä toiminut testauskytkentä on esitelty kuvassa 21. Työn luonteen vuoksi oli tärkeätä saada luotua mahdollisimman vakiona pysyvä sähköinen ympäristö, jolla voitiin tehdä referenssinä toimivat mittaukset. Tässä työssä käytettiin 800 kVA:n tehoista generaattoria, jonka jännitettä pystyttiin säätämään magnetointia muuttamalla. Generaattorin magnetoinnin muuttaminen muuttaa sen toimintapistettä, jolloin generaattorin induktanssit muuttuivat hieman kyllästyksen vaikutuksesta. Tämä aiheuttaa hieman virhettä jännitteen vaikutuksen mittaustuloksiin.

Syöttöverkon parametrit mitattiin Fluke 435 kolmivaiheisella verkkoanalysaattorilla. Laitteessa on datantallennusominaisuus, jolloin verkon tilaa pystyttiin seuraamaan ja tallentamaan koko mittauksen ajalta. Saaduista tuloksista laskettiin verkon sähköisille suureille keskiarvot jokaisesta mittauksesta erikseen.

Laitteen lähtösuureet mitattiin Yokogawa PZ4000 tehoanalysaattorilla. Yokogawalla





Kuva 21: Testauskytkentä syöttöjännitteen vaikutuksen selvittämiseksi

mitattiin myös lähdön jännitteen ja virran perusaaltojen suuruudet sekä välipiirin tasajännite. Mitatut parametrit ovat yksittäisiä tuloksia.

Kun sähköisiä parametrejä mitataan vain hetkellisesti, tulee mittaustilanteen pysyä vakiona koko testin ajan. Mitattaessa normaalissa syöttöverkossa, ei voida olettaa syöttöverkon pysyvän vakiona. Tämän työn mittauksissa käytetyn Fluke 435- mittarin etuna oli, että syöttöverkon pysyminen vakiona voitiin osoittaa mittaustuloksista, koska laite tallensi verkon tilan koko mittauksen ajalta.

ACS350-laitteessa on pakotettu ilmankierto, jonka stabiilius varmistettiin mittaamalla puhaltimen pyörimisnopeus kaikissa testeissä. Puhaltimen pyörimisnopeus mitattiin Monarch PLT200 mittarilla. ACS350-laitteen puhaltimen pyörimisnopeus pysyi testeissä noin prosentin sisällä nimellisuudesta.

Testeissä ACS350-laite ohjasi oikosulkumoottoria, jota kuormitettiin samalla akselilla olevalla moottorilla. Kuormamomentin tuottavaa moottoria ohjattiin ACS800-taajuusmuuttajalla. Testeissä testattavaa ACS350-laitetta käytettiin vektoriohjatuna nopeusohjeella, ja momentinsäädöstä huolehti kuormana oleva ACS800-laite, jonka ohjaukseen käytettiin DTC-säätöä. Momenttiohje pidettiin kaikissa testeissä testejä 15 ja 16 lukuunottamatta vakiona, jolloin saatiin vakioitua yksi muuttuja testitulokseen vaikuttavista tekijöistä.

Testilaboratorion ilmanlämpötila vaihteli testien aikana, joten jokaisen mittauksen tuloksia on redusoitu siten, että ne ovat vertailukelpoisia. Tarkemmat tiedot lämpötilanmittauksen anturipaikoista on koottu liitteeseen A, ja täydelliset testaustulokset löytyvät liitteestä B.

## 7.2 Verkon jännitteen vaikutus

Ensimmäisenä tutkittiin syöttöjännitteen vaikutusta laitteen toimintaan. Taulukossa 1 on esitelty jännitteen amplitudin sallittu vaihteluväli, joka teollisuuden luokan kaksi verkossa on kymmenen prosenttia. Käytännössä jännitteen vaihtelut pysyvät alle mainitun maksimirajan, ja tässä työssä on käsitelty tapaukset, joissa verkon jännite muuttuu  $\pm 5$  prosenttia nimellisjännitteestä. Käytettävä testauskytkentä on esitelty aiemmin kuvassa 21.

Koska taajuusmuuttajassa on häviöitä, ei syöttöjännitteestä saada muodostettua samansuuruista lähtöjännitettä moottorille. Tyypillisesti jännitehäviö on noin 5 prosenttia syöttöjännitteestä. Tällöin käytettäessä 400 voltin moottoria nimellistaajuudella, täytyy verkon jännitteen olla vähintään 5 prosenttia korkeampi, eli noin 420 voltia, jotta moottorille voidaan tuottaa täysi lähtöjännite.

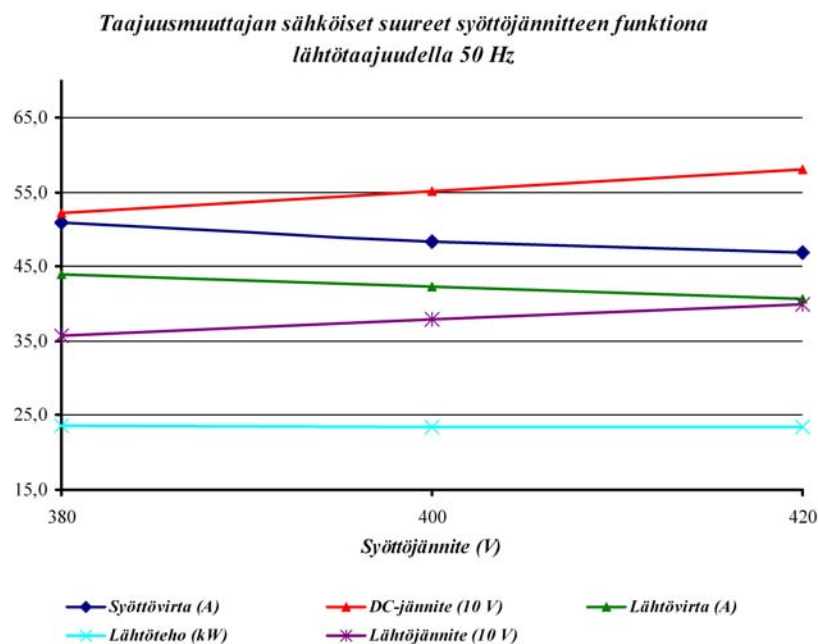
Valittua testilaitetta käytetään yleisimmin juuri 400 voltin syöttöverkossa, jolloin laite ei pysty milloinkaan tuottamaan nimellistä lähtöjännitettä moottorille nimellisyörimisnopeudella 50 hertsiä. Tällöin taajuusmuuttaja korvaa puuttuvaa jännitettä lisäämällä lähtövirtaa, jolloin saavutetaan haluttu lähtöteho ja -momentti. Laitetta testattiin myös taajuudella 25 hertsiä, jolloin välipiirin tasajännitteen suuruus ei rajoittanut lähtöjännitteen muodostamista.

Varsinaiset testijännitteet olivat 380, 400 ja 420 voltia. Näin käsiteltiin viiden prosentin jännitevaihtelun aiheuttamat muutokset laitteen toimintapisteessä.

Kuvassa 22 esitellään laitteen sähköisten suureiden käyttäytymistä, kun syöttöjännitettä muokataan. Kuvasta nähdään, että syöttöjännitteen kasvaessa laitteen välipiirin tasajännite kasvaa lineaarisesti, ja syöttövirta vastaavasti pienenee. Moottorilähdön pätöteho pysyy kaikissa mittauksissa vakiona. Käytetyn oikosulkumoottorin nimellisjännite on 400 voltia, jonka suuruinen lähtöjännite saavutetaan kun syöttöjännite on 420 voltia. Tämän jälkeen lähdön jännite ja virta pysyisivät vakiona, vaikka syöttöjännitettä nostettaisiin edelleen (liite B, testit 6-9).

Kuvassa 23 on esitelty laitteen lämpötilojen käyttäytyminen syöttöjännitteen funktiona. Vaihtosuuntaajan lämpötila määräytyy kahdesta hallitsevasta häviötehoa tuottavasta komponentista. Kytkemis- ja katkaisuhäviöt riippuvat välipiirin tasajännitteestä yhtälöiden (45) ja (46) mukaisesti, joten diodisillan tapauksessa syöttöjännitteen taso vaikuttaa suoraan vaihtosuuntaajan puolijohteiden kytkentähäviöihin. Tällöin syöttöjännitteen nostamisesta aiheutuva tasajännitevälipiirin jännitteen kasvu lisää vaihtosuuntaajan häviöitä. Johtohäviöt riippuvat taas yhtälöiden (43) ja (44) mukaisesti vaihtosuuntaajan virrasta, jolloin virran kasvu suurentaa häviöitä ja pieneminen vähentää häviöitä.

Kuvasta 22 nähdään, että toimittaessa liian pienellä syöttöjännitteellä ei lähtömomentin ja lähtövirran suhde pysykään vakiona, vaan laitteen säätö kompensoi riittämätöntä lähtöjännitettä lisäämällä lähtövirtaa, jotta lähtöteho pysyisi vakiona. Tällöin jännitteen lisääminen aiheuttaa vaihtosuuntaajaan kaksi päällekkäistä ilmiötä. Pienenevä lähtövirta pienentää johtohäviöitä ja suureneva syöttöjännite lisää kytkentä- ja katkaisuhäviöitä.



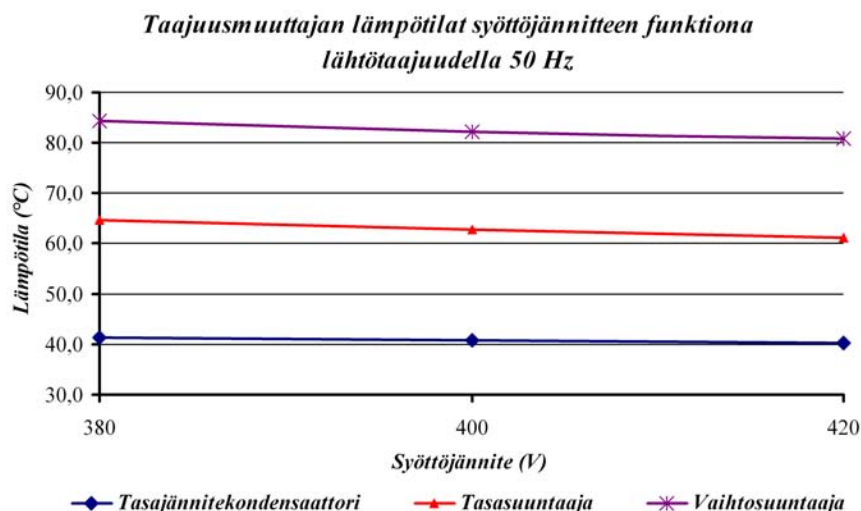
Kuva 22: Taajuusmuuttajan sähköiset suureet syöttöjännitteen funktiona lähtötaajuudella 50 Hz

Syöttöjännitteen vaihtelu välillä 380-420 voltia muuttaa invertterin lämpötiloja siten, että ääripäiden lämpötilaero on 3,4 °C. Lämpötilojen muutos on 6,1 prosenttia komponentin kokonaislämpenemästä.

Tasasuuntaajan häviöt aiheutuvat pääasiassa diodien johtohäviöistä yhtälön (34) mukaisesti. Kun taajuusmuuttajan lähtöteho pysyy vakiona, pysyy myös välipiirin teho vakiona. Tällöin syöttöjännitteen noustessa täytyy syöttövirran pienentyä, jotta tasasuuntaajan läpi virtaava teho pysyisi vakiona. Kuvasta 23 nähdään, että tasasuuntaajan lämpötila laskee syöttöjännitteen kasvaessa.

Syöttöjännitteen vaihtelu välillä 380-420 voltia muuttaa tasasuuntaajan lämpötiloja siten, että ääripäiden lämpötilaero on 3,5 °C. Lämpötilojen muutos on 9,7 prosenttia komponentin kokonaislämpenemästä. Suuren tasasuuntaajan lämpötilanmuutoksen saattaa osittain selittää se, että tasasuuntaaja ja vaihtosuuntaaja jäähdytetään samalla jäähdytyselementillä.

Tasajännitevälipiirin kondensaattorien häviöt aiheutuvat yliaaltovirroista, joiden tasoitamista varten välipiirin kondensaattorit on tarkoitettu. Käytännössä tasajännitevälipiiriä syöttävän tasasuuntaajan ja sitä kuormittavan vaihtosuuntaajan virrat eroavat toisistaan, jolloin niiden virtojen erotus kulkee kondensaattorin läpi. Kondensaattorin taajuuskäyttäytyminen vaihtelee, ja kondensaattorin ESR (Effective Series Resistance) muuttuu taajuuden funktiona. Tällöin muutos verkossa, joka lähes poikkeuksetta muuttaa sekä tasasuuntaajan että vaihtosuuntaajan toimintapistettä, muuttaa myös tasajännitekondensaattorin virtaa. Kondensaattorin häviöt



Kuva 23: Taajuusmuuttajan lämpötilat syöttöjännitteen funktiona lähtötaajuudella 50 hertsiä

muuttuvat sen virran muuttuessa yhtälön (33) mukaisesti. Kuvasta 23 nähdään, että jännitteen kasvattaminen pienentää kondensaattorin lämpötilaa.

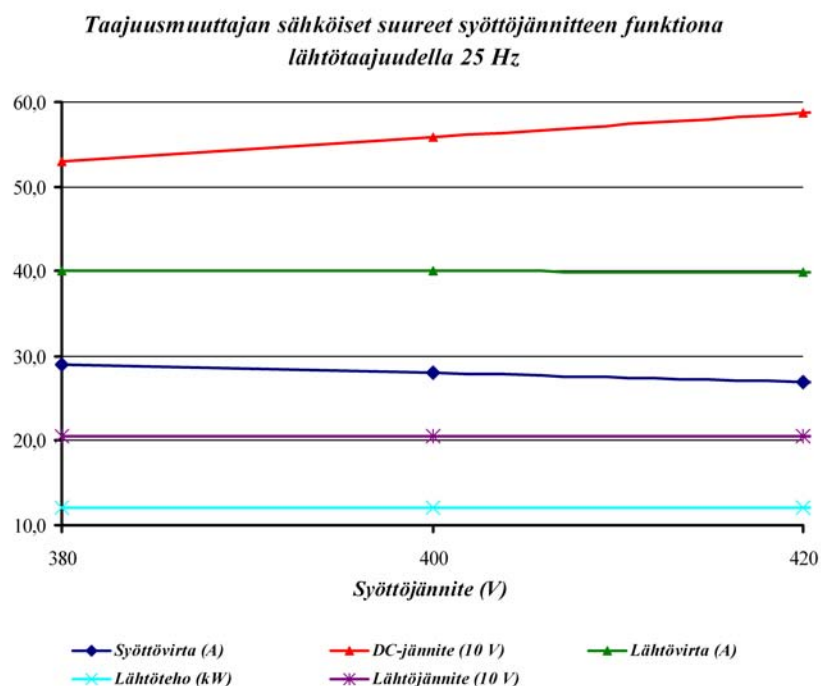
Syöttöjännitteen vaihtelu välillä 380-420 voltia muuttaa tasajännitevälipiirin kondensaattorin lämpötiloja siten, että ääripäiden lämpötilaero on 1,0 °C. Lämpötilojen muutos on 6,5 prosenttia komponentin kokonaislämpenemästä.

Kuvasta 23 nähdään, että syöttöjännitteen vaihtelusta aiheutuu muutoksia lämpötilan mittaustuloksiin, jotka ylittävät aiemmin kappaleessa 6.2 saadut lämpötilan mittausepävarmuuden rajat. Huomattavin prosentuaalinen muutos aiheutui tasasuuntaajaan, jonka lämpötilat nousivat lähes 10 prosenttia.

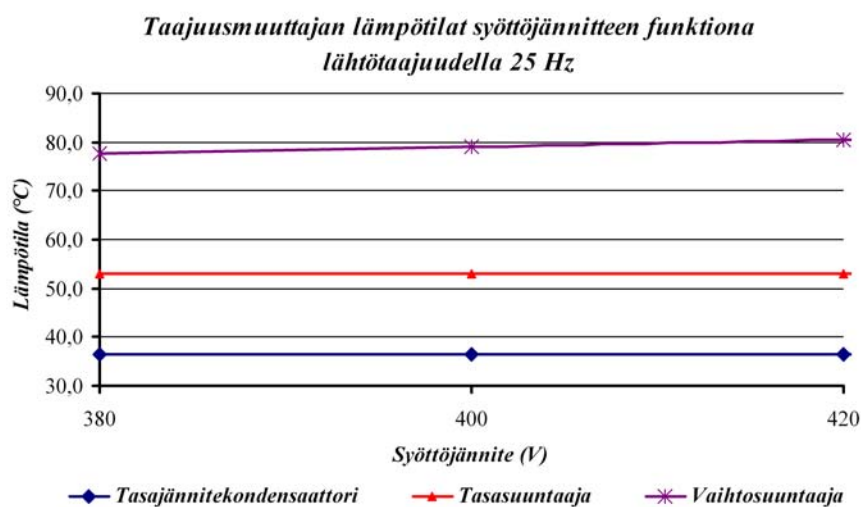
Kuvassa 24 esitellään sähköisten suureiden käyttäytyminen lähtötaajuudella 25 hertsiä, jolloin saavutettava lähtöjännite on aina riittävä. Kuvassa 25 esitellään lämpötilojen käyttäytyminen lähtötaajuudella 25 hertsiä. Kuvasta 24 nähdään, että taajuusmuuttajan lähtöjännite pysyy vakiona, vaikka syöttöjännitettä muutetaan. Tällöin lähtövirta pysyy vakiona, samaten invertterin johtohäviöt. KytKentä- ja katkaisuhäviöt kasvavat jännitteen noustessa, joten invertterin lämpötila nousee.

Syöttöjännitteen vaihtelu välillä 380-420 voltia muuttaa invertterin lämpötiloja siten, että ääripäiden lämpötilaero on 2,8 °C. Lämpötilojen muutos on 5,1 prosenttia komponentin kokonaislämpenemästä. Huomattavaa on, että invertterin lämpötilanmuutos jännitteen vaikutuksesta vaihtaa suuntaa kun moottorin toimintapistettä muutetaan.

Verkosta otettavan pätötehon puolittuessa myös syöttövirta puolittuu. Tässä toimintapisteesä tasasuuntaajan ja tasajännitekondensaattorin lämpötilat muuttuvat hyvin vähän syöttöjännitteen muuttuessa, sillä syöttövirran muutos on pienempi.



Kuva 24: Taajuusmuuttajan sähköiset suureet syöttöjännitteen funktiona lähtötaajuudella 25 Hz



Kuva 25: Pääpiirin komponenttien lämpötilat lähtötaajuudella 25 hertsiä

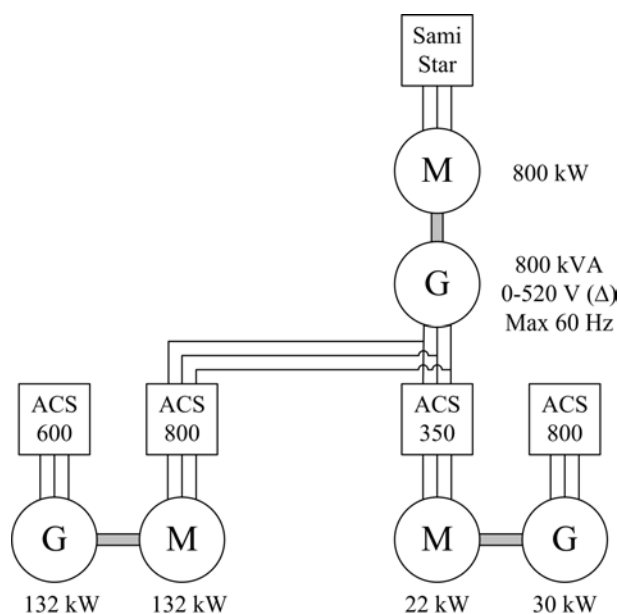
Syöttöjännitteen vaihtelusta verkossa aiheutuu ongelmia käytännön mittaustilanteissa, koska komponenttien lämpötilat eivät tasaannu syöttöjännitteen vaihdellessa. Tällöin verkon tilan seuraaminen koko mittauksen ajalta on oleellista, jotta tiedetään

millaisesta verkosta loppulämpötilat on lopulta tallennettu. Verkon tila voi muuttua tunteja kestävässä testeissä huomattavasti, jolloin testin aluksi mitatut syöttöverkon suureet eivät enää välttämättä päde testin lopussa.

### 7.3 Verkon yliaaltojen vaikutus

Yliaaltojen vaikutusta testattiin kuudessa eri verkko-olosuhteessa. Referenssiolosuhteet saatiin aikaan jännitteen vaikutuksen määrittämiseen käytetyllä kokoonpanolla, jossa generaattoria kuormitti ainoastaan testattava taajuusmuuttaja (liite A, testi 3). Ensimmäiset yliaaltojen vaikutusta tutkivat testit tehtiin muokkaamalla jännitteen vaikutuksen tutkimiseen käytettyä kokoonpanoa siten, että samasta generaattorisytöstä syötettiin tehoa myös toiselle generaattoria kuormittavalle taajuusmuuttajalle.

Testattavan ACS350- taajuusmuuttajan nopeusohje ja sitä kuormittavan käytön momenttiohje pidettiin samana kuin referenssimittauksissa. Käytetty testauskytkentä on esitelty kuvassa 26.

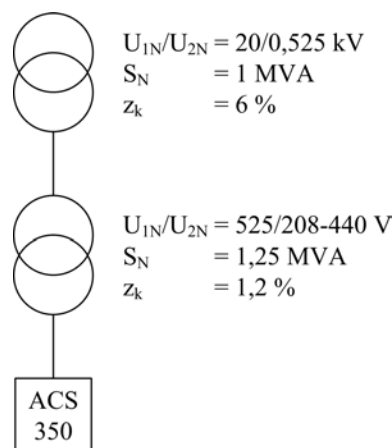


Kuva 26: Testauskytkentä, kun verkossa on ylimääräinen kuorma: ACS800 + ACS600

Ensimmäinen ylimääräinen kuorma oli ACS800- taajuusmuuttaja, jonka syöttöryhmä oli puoliksi tyristorein ohjattu tasasuuntaaja. Tyristoreita ohjataan kuitenkin vain käynnistyksessä, joten normaalissa kuormitustilanteessa tasasuuntaussilta käytäytyy kuin diodisilta. Käyttöä kuormitettiin ACS600- taajuusmuuttajalla, ja generaattorin kuormitusta kasvatettiin tarkoituksena lisätä jännitesäröä verkossa (liite A, testi 11).

Toinen ylimääräinen kuorma oli samaan generaattorisyytöön lisätty aktiivisella verkkosuuntaajalla varustettu ACS800- taajuusmuuttaja. Tällä kuormalla toistettiin testi muuten samanlaisissa olosuhteissa (liite A, testi 23). Diodisillan ja aktiivisen verkkosuuntaajan tuottamat yliaallot ovat erilaisia, jolloin saman särökertoimen voi tuottaa kaksi täysin erilaista yliaaltosisältöä verkossa.

Seuraavaksi testattiin laitteen toimintaa normaalissa muuntajasyötössä. Syöttö on esitelty kuvassa 27. Tässä verkossa testattiin kolme erilaista tilannetta. Optimaalisessa tilanteessa verkkoa kuormitti vain mitattava ACS350-taajuusmuuttaja sekä sen kuormana toimiva ACS800-taajuusmuuttaja (liite A, testi 22). Toisessa tilanteessa verkkoon kytkettiin tyhjäkäyväksi suurehko verkkovaihtosuuntaaja 500 voltin jänniteportaaseen, josta aiheutui verkkoon korkeataajuisia yliaaltoja (liite A, testi 21). Verkon syöttö keskijänniteverkosta tulee 500 voltin jänniteportaaseen, johon myös laboratorion kuormia ohjaavana käyttönä toimivan taajuusmuuttajan verkkosuuntaaja on kytketty. 400 voltin jakelu on toteutettu säästömuuntajalla, jolloin verkon 500 voltin jänniteportaassa oleva jännitesärö heijastuu lähes vaimentumatomana 400 jänniteportaaseen.



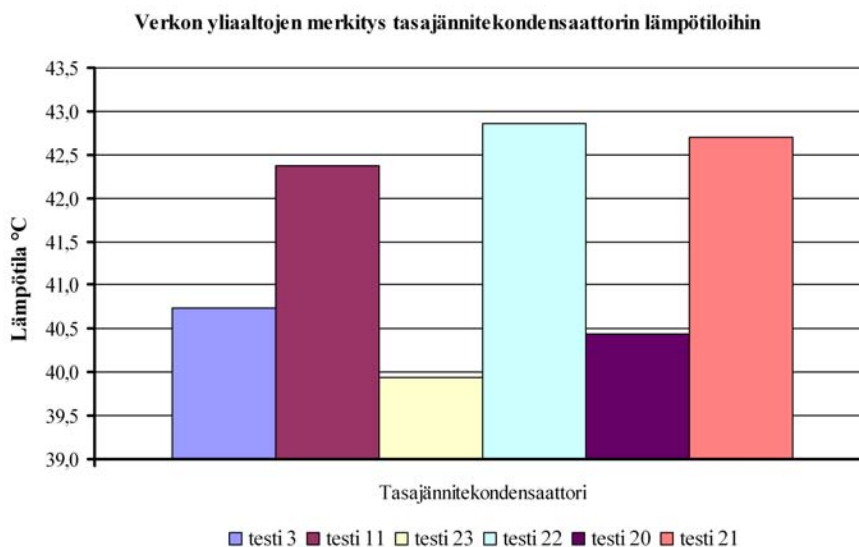
Kuva 27: Syöttöverkko muuntajasyötöllä

Kolmas ja viimeinen kombinaatio tässä syöttöverkossa oli lisätä verkkoon 400 voltin jänniteportaaseen dioditasasuuntaajakuorma, jolla verkkoa kuormitettiin (liite A, testi 20). Tällöin kuormana toimivan laitteen verkkosuuntaaja syötti tehon takaisin 500 voltin jänniteportaaseen.

Eri testeissä mitatut lämpötilat on esitelty pääpiirikomponenteittain kuvissa 28-30. Kolme ensimmäistä palkkia kuvissa ovat 800 kVA:n generaattorisyytöllä tehdyistä testeistä ja kolme viimeistä 1,25 MVA muuntajasyötöllä tehdyistä testeistä.

Kuvassa 28 on esitelty tasajännitevälipiirin kondensaattorin lämpötilat. Tuloksista nähdään, että lämpötilaero suurimman ja pienimmän välillä on  $3,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tämä on noin 20 prosenttia komponentin lämpenemästä. Kondensaattorien lämpötiloista nähdään, että verkon kuormittaminen diodisillalla lisää kondensaattorien lämpötilaa. Verkossa tyhjäkäyvä verkkovaihtosuuntaaja ei vaikuta kondensaattorin lämpötiloihin, mutta

kuormitettu verkkovaihtosuuntaaja aiheuttaa kondensaattorien lämpötilassa laskua.



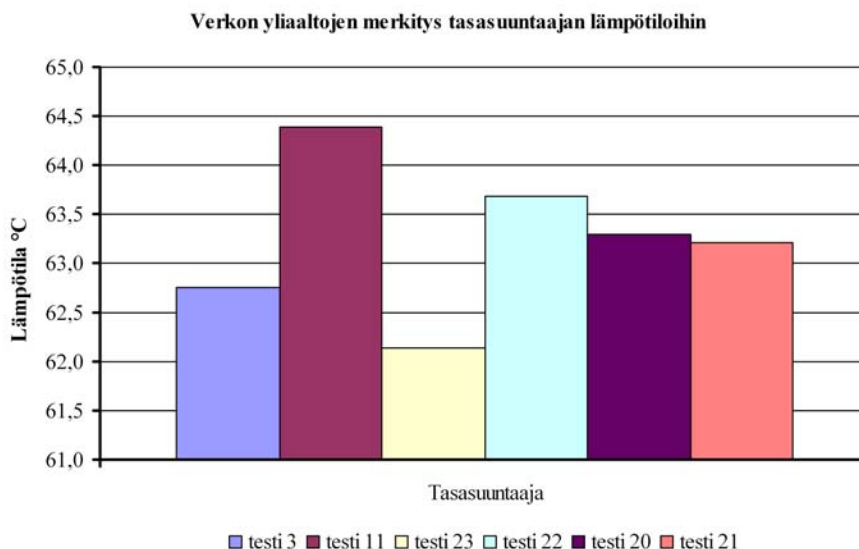
Kuva 28: Jänniteyliaaltojen vaikutus tasajännitekondensaattorin lämpötilaan. Testien selitykset on esitelty liitteessä A.

Kuvassa 29 on esitelty tasasuuntaajan lämpötilat. Tasasuuntaajan tuloksista lämpötilaeroksi suurimman ja pienimmän välillä saadaan 2,3 °C. Tämä on noin 6 prosenttia komponentin lämpenemästä. Tasasuuntaajan häviöt muuttuvat yhtälön 34 mukaisesti laitteen syöttövirran mukaan. Myös saadut tulokset tukevat tätä tietoa. Tehon pysyessä vakiona jänniteyliaaltojen lisääntyminen verkossa lisää laitteen syöttövirtaa, jolloin myös johtohäviöt kasvavat ja komponentin lämpötila nousee.

Kuvassa 30 on esitelty vaihtosuuntaajan lämpötilat testatuissa verkko-olosuhteissa. Vaihtosuuntaajan tuloksista nähdään, että lämpötilaero suurimman ja pienimmän välillä on 2,1 °C. Tämä on noin 4 prosenttia komponentin lämpenemästä. Kappaleessa 4.4 esiteltyjen yhtälöiden perusteella vaihtosuuntaajan häviöteho muodostuu kahdesta komponentista, kytkentähäviöistä ja johtohäviöistä. Verkon yliaaltojen lisääntyessä myös verkon kuormitus usein lisääntyy. Tällöin vakiona pysyvällä syöttöjännitteellä saavutettava välipiirin jännite muuttuu. Välipiirin jännitteen laskiessa tapahtuu laitteen nimellispisteessä kaksi päällekkäistä ilmiötä. Kytkentähäviöt pienenevät välipiirin jännitteen laskiessa. Toisaalta kun välipiirin jännite laskee kriittisen rajan alle, joka tämän työn tapauksessa on noin 420 voltia, alkaa taaajuusmuuttajan lähtövirta kasvaa, jolloin johtohäviöt lisääntyvät.

Tuloksista nähdään, että tasajännitevälipiirin kondensaattorit ovat selkeästi eniten riippuvaisia verkon yliaaltosisällöstä. Vaihtosuuntaajan muuttuneet lämpötilat selittyvät pääasiassa verkon jännitteen ja kuormituksen muuttuessa vaihdelleesta tasajännitteestä. Yliaalloilla oli vaikutusta tasasuuntaajan toimintaan astemääräisesti jopa enemmän kuin kondensaattoreihin, mutta lämpenemään suhteutettuna muutos





Kuva 29: Jänniteyliaaltojen vaikutus tasasuuntaajan lämpötilaan. Testien selitykset on esitelty liitteessä A.

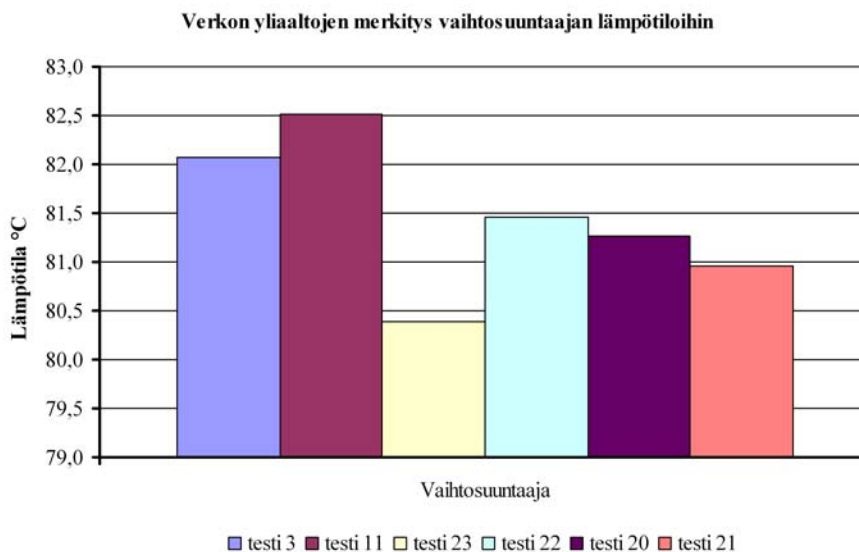
on pienempi. Tasajännitevälipiirin kondensaattorin lämpötilan laskeminen aktiivisen verkkosuuntaajan kuormittamassa verkossa on mielenkiintoinen. Lämpötilojen laskemisen yksi selittävä tekijä on muutos ACS350-laitteen syöttövirrassa. Aktiivisen verkkosuuntaajan kuormittamassa verkossa syöttövirran käyrämuoto muuttui siten, että osa virtapulseista madaltui ja leveni. Koska kondensaattorin häviöriippuvuus virtaan on neliöllinen yhtälön (33) mukaisesti, edellä kuvatut muutokset virran käyrämuodossa vähentävät kondensaattorin tehohäviöitä.

Syöttöverkon parametrit ja tarkat lämpötilanmittaustulokset on esitelty testikohtaisesti liitteessä B. Testien selitykset on koottu liitteeseen A.

## 7.4 Verkon epäsymmetrisyyden vaikutus

Epäsymmetrinen syöttö saatiin muodostettua lisäämällä testattavaan ACS350- käyttöön optiona saatavilla oleva syöttöpuolen kolmivaiheinen kuristin. Kun yksi kuristimen vaiheista oikosuljettiin, saatiin eri verkon vaiheisiin erisuuruiset induktanssit, joka pakottaa kuormitettaessa testattavan laitteen syöttöjännitteen epäsymmetriseksi. Saadut mittaustulokset on esitelty kuvassa 31. Testin 3 tulokset ovat tilanteesta, jossa syöttöverkossa ei ole ylimääräistä induktanssia. Testin 24 tulokset ovat tilanteesta, jossa kaikki kuristimen vaiheet ovat kytkettynä ja syöttö on symmetrinen. Testissä 25 verkon U-vaiheessa oleva induktanssi oikosuljettiin. Testissä verkon epäsymmetriaksi saatiin  $u_{neg} = 1,3 \%$ .

Kuvasta 31 nähdään, että invertterin lämpötilat seuraavat muuttuvaa välipiirin jän-



Kuva 30: Jänniteyliaaltojen vaikutus vaihtosuuntaajan lämpötilaan. Testien selitykset on esitelty liitteessä A.

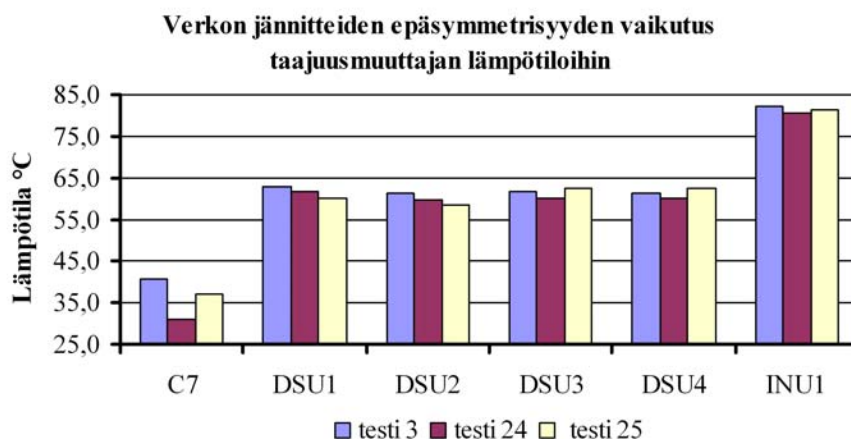
nitettä, kuten kappaleessa 7.2 on selvitetty. Syöttöverkossa olevan induktanssin määrä vaikuttaa vahvasti välipiirin kondensaattorin lämpötilaan. Kuvan 31 mukaisesti kuristimen vaiheen oikosulkeminen nostaa kondensaattorin lämpötilaa  $5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , joka vastaa komponentin lämpenemän kaksinkertaistumista.

Tasasuuntaajan mittaustulosten analysoinnissa on huomioitava, että vaihevirrät eivät ole samansuuruisia, kun syöttöjännite on epäsymmetrinen. Tämä nähdään hyvin testituloksista. Testeissä 3 ja 24 mitattujen lämpötilojen keskinäiset suhteet pysyvät samoina pisteiden DSU1-DSU4 välillä. Kuumimman tuloksen antaa anturi DSU1. Epäsymmetrisellä syötöllä puolijohteiden virrat muuttuvat erisuuriksi, ja kuumimman tuloksen antaa anturi DSU3.

Verkon epäsymmetria aiheuttaa merkittävän muutoksen välipiirin kondensaattorin lämpötilaan. Tasasuuntaajan anturikiinnityksille se aiheuttaa uuden epävarmuuslähteen, koska tasasuuntaajan vaihevirrät ja näin myös eri vaiheiden häviötehot eivät ole samansuuruisia.

## 7.5 Verkon ja testattavan laitteen oikosulkusuhteen vaikutus

Tässä kappaleessa testattava laite kytkettiin kahteen erilaiseen generaattorisyytöön, joilla oli erilaiset oikosulkutehot. Verkon oikosulkutehon pienentyessä laitteen tuottamat yliaaltovirrät tuottavat suurempia yliaaltojännitteitä verkkoon, koska verkon impedanssi suurenee oikosulkutehon pienentyessä. Suurentunut verkon impedanssi li-



Kuva 31: Verkon jännitteiden epäsymmetrisyyden vaikutus taajuusmuuttajan lämpötiloihin. Mittapistet ja testit on selitetty liitteessä A.

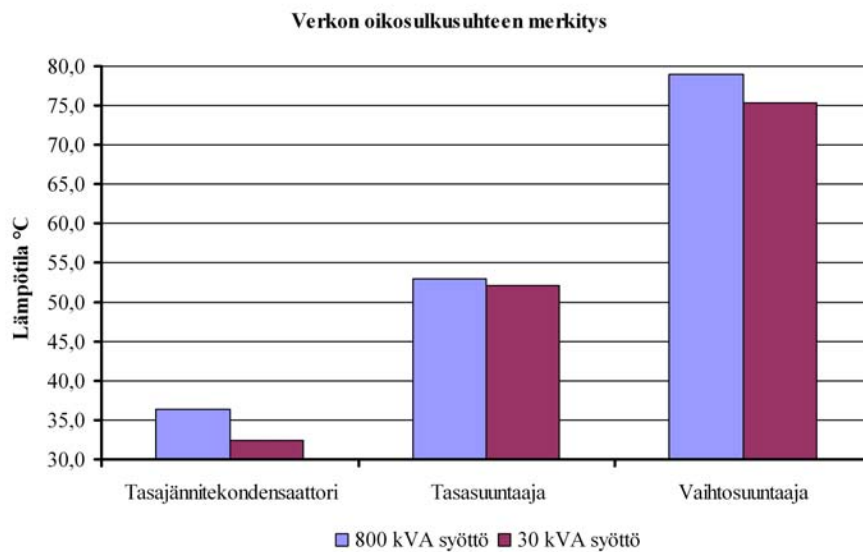
sää tasajännitteenalenemaa välipiirissä yhtälön (3) mukaisesti.

Oikosulkusuhteen merkityksen todistamiseksi laitetta testattiin mahdollisimman pienitehoisella generaattorilla. Generaattorin nimellisteho oli 30 kVA. Testeissä huomattiin, ettei kyseistä taajuusmuuttajaa voi käyttää täydellä teholla syöttöverkossa, jonka nimellisteho on näin lähellä laitteen nimellistehoa. Laitteen verkkoon syöttämät virtayliaallot säröyttivät jännitteen käyrämuodon niin pahoin, että saatava tasajännitteen sykkeisyys kasvoi huomattavan suureksi, ja laite kytkeytyi vikatilaa. Laitetta pystyttiin kuitenkin kuormittamaan puolella teholla siten, että moottorin pyörimisnopeus puolitettiin. Tällöin invertterissä säilyy nimellisvirta, koska kuormittava momentti on edelleen nimellinen.

Saadut tulokset on esitelty kuvassa 32. Tuloksista nähdään, että kaikkien komponenttien lämpenemä pienenee. Tasasuuntaajan lämpötila pienenee 0,9 °C, sillä yliaaltojen osuus laitteen syöttövirrasta laskee, vaikka perustaaajuinen komponentti ei muutukaan. Välipiirin kondensaattorien lämpötila pienenee 4,0 °C. Tähän syynä on esimerkiksi tasajännitteen sykkeisyyden pieneneminen, jolloin myös kondensaattorin virta pienenee. Vaihtosuuntaajan lämpötila laskee tasajännitteen laskiessa 3,6 °C. Toimittaessa puolella taajuudella on tasajännite aina riittävä sopivan lähtöjännitteen tuottamiseksi. Tällöin pienenevä tasajännite ei lisää lähtövirtaa eikä myöskään johtohäviöitä.

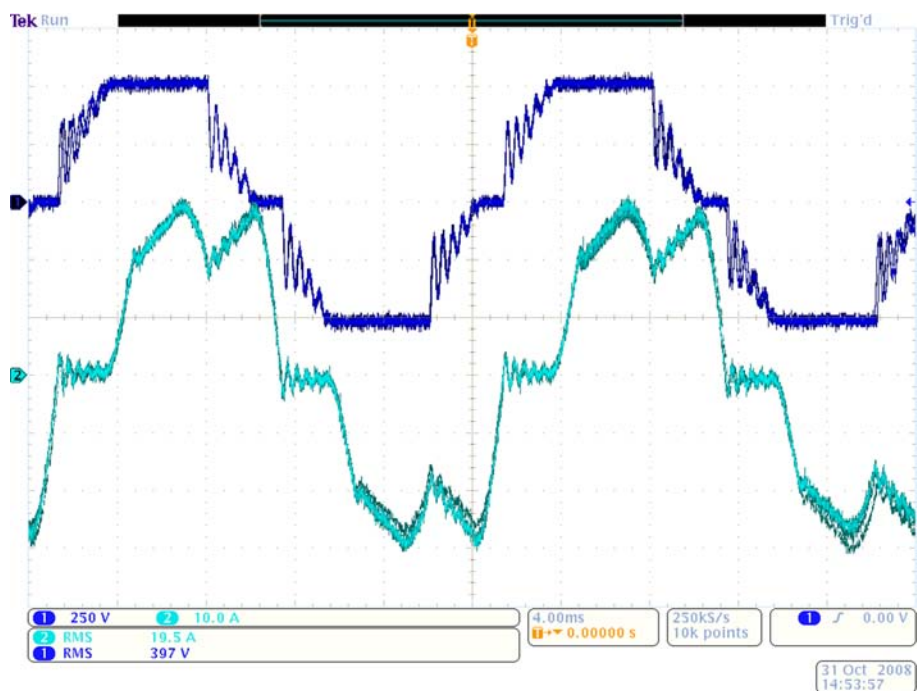
Kuvasta 33 nähdään, että 30 kVA:n generaattorilla taajuusmuuttajan toimintatila muuttuu, ja laitteen virta käyttäytyy kuin siinä olisi tulokuristin. Kuvassa 34 on esitelty laitteen virran käyrämuoto 800 kVA:n generaattorilla. Lisäksi huomataan, että pienitehoisen generaattorin jännitesäätö on epäideaalinen, jolloin jännitteen käyrämuodon huippu on korostetun leikkaantunut.

Syöttöverkon impedanssin merkitys taajuusmuuttajan toimintatilaan on merkittä-

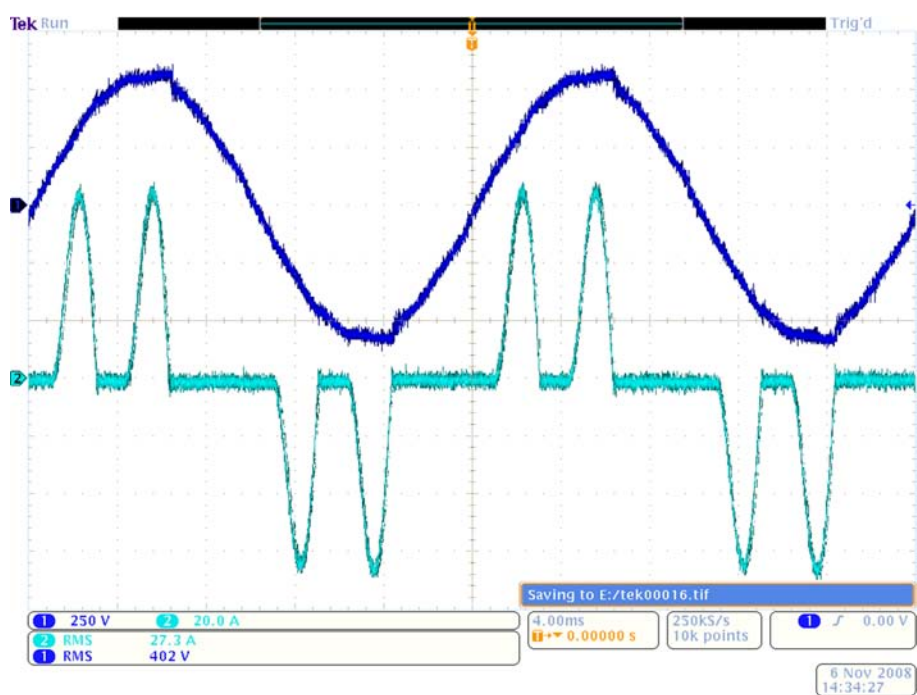


Kuva 32: Oikosulkusuhteen vaikutus laitteen lämpötiloihin

vä. Kahdella erilaisella oikosulkusuhteella tehtyjä testituloksia ei voi verrata suoraan toisiinsa. Tämä on huomioitava, jos testejä tehdään useissa laboratorioissa, jolloin syöttömuuntajissa on suurella todennäköisyydellä eroa.



Kuva 33: Syöttövirran ja jännitteen käyrämuodot 30 kVA:n syötössä



Kuva 34: Syöttövirran ja jännitteen käyrämuodot 800 kVA:n syötössä

## 8 Tulosten tarkastelu

Kaikki tulokset osoittavat, että luotettavien testitulosten mittaaminen taajuusmuuttajasta vaatii asiantuntemusta. Epäonnistuneella anturin kiinnityksellä mittausten tekeminen estyy kokonaan. Pahimmassa tapauksessa anturi mittaa lämpötilaa näennäisen tarkasti, mutta mitattava piste ei vastaa haluttua pistettä.

Muutokset sähköisissä ilmiöissä vaikuttavat taajuusmuuttajan toimintapisteeseen, jolloin tasaisen testausolosuhteen luominen kantaverkosta syöttöjännitteensä saavan muuntajan kautta on lähes mahdotonta. Yksittäisiä mittaustuloksia haettaessa ei ole kuitenkaan merkitystä millaisessa syöttöverkossa tulokset saadaan, kunhan olosuhteet ovat tunnetut. Taajuusmuuttajan tulee toimia luotettavasti myös kun verkon tila poikkeaa ideaalisesta. Komponenttitestaukseen ja vertailumittaukseen tarvitaan kuitenkin vakaampi syöttö. Tällöin generaattorin käyttäminen on lähes välttämätöntä. Generaattorien tuottamassa jännitteen käyrämuodossa on kuitenkin eroja, jolloin hyödyn generaattorin käytöstä saa vain jos generaattorin koko verrattuna testattavaan laitteeseen on tarpeeksi suuri.

### 8.1 Lämpötilanmittauksen epävarmuudet

Saaduista tuloksista nähdään, että lämpötilan mittaasanturin kiinnityksellä ja pinta-anturin tyypillä on merkittävä vaikutus mittaustuloksiin, kun mitattava piste on pakotetun ilmankierron piirissä. Lämpötilanmittauksen mittausepävarmuudeksi saatiin  $\pm 1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mittausepävarmuutta voitaisiin pienentää mittausjärjestelyn kalibroinnilla huomattavasti.

Merkittävämpi tulos oli kuitenkin se, että mitattaessa kiehuvan veden lämpötilaa saatavan mittaustuloksen estimaatti poikkeaa halutusta lämpötilasta  $5,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Huonoimman kiinnityksen mittaustulos poikkesi kiehuvan veden lämpötilasta  $6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tuloksista nähdään selkeästi, että mitattavan pinnan ja lämpötila-anturin välille muodostuu suuria lämpötilagradientteja. Tällöin mitta-anturin paikka tulee valita huolella, jotta voidaan olla varmoja siitä, mitä todella mitataan.

Anturia kiinnitettäessä optimaalinen tilanne olisi siis, että pinnan ja anturikiinnityksen termiset ominaisuudet olisivat samankaltaiset. Tällöin anturi ei häiritsisi pinnan normaalia jäähtymistä, ja mitattu lämpötila olisi todellinen pintalämpötila ilman kierrosta huolimatta. Todellisuudessa anturin ominaisuudet poikkeavat pinnan ominaisuuksista, eikä näin yksinkertaista tarkastelua voida tehdä. Tuloksista nähdään, että sähköinen eriste huonontaa termistä kontaktia anturin ja mitattavan pinnan välillä. Eristeliima anturin ja jäähdytysilman välissä taas huonontaa anturin jäähtymistä jäähdytysilman vaikutuksesta. Voidaan kuitenkin sanoa, että eristeen käyttö molemmilla puolilla huonontaa sekä anturin lämpenemistä että jäähtymistä, jolloin vaikutukset ovat vastakkaiset.

Tapauksessa, jossa konvektion aiheuttamat lämpötilagradientit on eliminoitu nähdään, että lämpötilat eri termoparien välillä ovat hyvin samankaltaiset. Kalibroimalla valmiin termopariyhteyden esimerkiksi lämpökaapissa voidaan mittauksen

epävarmuutta pienentää standardien ja datalehtien antamasta pahimman tapauksen epävarmuudesta. Tällöin termoparimenetelmällä pystytään mittaamaan myös pieniä lämpötilaeroja. Nykyisellään hyvänä nyrkkisääntönä mittausepävarmuudelle voidaan pitää  $\pm 2$  °C. Lisäksi pitää huomioida anturin kiinnityksen epäideaalisuudesta aiheutuva pysyvä poikkeama mittaustulokseen.

Lämpötilanmittausten kehittämiseksi olisi tärkeää vakioida käytettäviä menetelmiä, jotta tulokset olisivat paremmin vertailukelpoisia. Erilaisten komponenttien pintalämpötilojen mittaamiseen pitäisi määritellä erikseen käytettävät kiinnitystavat, jolloin voidaan arvioida mittauksen epävarmuuksia tarkemmin.

Tapauksissa, joissa antureita porataan pintojen sisälle tulisi testata kaupallisesti valmistettuja antureita, jolloin anturin valmistuksesta aiheutuvista ongelmista päästäisiin. Samoin voitaisiin käyttää tarpeen mukaan valmiiksi sähköisesti eristettyä anturia, jolloin mittaustarkkuudet paranisivat huomattavasti haastavissa käyttökohteissa. Nykyisin anturia ei voida porata pintaan, jonka potentiaali poikkeaa maapotentiaalista.

Tarvittaessa tarkempaa lämpötilanmittausta tulisi tutkia mahdollisuutta kalibroida valmiita lämpötilanmittausjärjestelyjä, jolloin lämpötilanmittauksen mittausepävarmuutta voitaisiin pienentää huomattavasti nykyisestä kahdesta asteesta. Mahdollinen toteutustapa olisi kalibroida anturi paikalleen kiinnitettynä lämpökaapissa, jonka lämpötila nostetaan tietyksi ja annetaan tasaantua, kunnes termodynaaminen tasapainotila on saavutettu. Tämä vaatisi lämpökaapilta tarkkoja säätöominaisuuksia, jotta haluttu lämpötila pystyttäisiin ylläpitämään halutulla tarkkuudella koko kalibroinnin ajan.

Taajuusmuuttajan komponenteissa on valmistuksen toleransseista aiheutuvia eroavuuksia, jolloin myös lämpenemätestien tulokset muuttuvat laitteen muuttuessa. Simuloimalla tulisi varmistaa toleranssien ääripäissä olevien komponenttien häviötehoissa olevat eroavuudet, jonka jälkeen voitaisiin mitata toleranssirajojen molemmissa ääripäissä olevien laitteiden lämpenemätestien tulokset. Näin saataisiin laiteyksilöstä riippuvat rajat lämpenemätestien tuloksille. Tämä on oleellista, jos tyyppitestien tuloksia halutaan myöhemmin tarkentaa. Jos oleellisten pääpiirikomponenttien sijoittuminen omiin toleranssirajoihinsa ei ole tunnettu, antaa uudella laitteella tehtyjen mittaustulosten vertaaminen vanhoihin testituloksiin hyvin epäluotettavia tuloksia.

## 8.2 Syöttöverkosta aiheutuvat epävarmuudet

Saaduista tuloksista nähdään, että kaikki käsitelty verkko muuttuvat parametrit vaikuttavat taajuusmuuttajan lämpenemätesteissä saataviin tuloksiin. Koska mitaukset on tehty vain yhdelle laitetypille sekä vain yhdelle laitetypin yksilölle, ei astemääräisistä tuloksista voida tehdä yleisiä johtopäätöksiä. Kappaleessa 4 esitellyt komponenttien häviöyhtälöt ovat yleisiä, joten kappaleessa 7 esitellyt lämpötilojen muutosten syyt eivät ole laiteriippuvaisia.

Taulukkoon 14 on koottu yhteenveto syöttöverkon ominaisuuksien vaikutuksista. Tuloksista nähdään, että syöttöjännitteen muutokset vaikuttavat merkittävimmin tasasuuntaajaan ja vaihtosuuntaajaan. Verkon yliaallot vaikuttavat tasaisesti kaikkiin taajuusmuuttajan pääpiirikomponentteihin. Verkon epäsymmetrisyys vaikuttaa selkeästi eniten välipiirin kondensaattoreihin. Oikosulkusuhte vaikuttaa välipiirin kondensaattoreihin sekä vaihtosuuntaajaan, mutta tasasuuntaajaan sen vaikutus on pienempi.

Taulukko 14: Syöttöverkon ominaisuuksien aiheuttamat muutokset taajuusmuuttajan lämpötiloihin

|                            | Tasajännite-<br>kondensaattori | Tasa-<br>suuntaaja | Vaihto-<br>suuntaaja |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|
| Syöttöjännitteen vaikutus  | 1,0 °C                         | 3,5 °C             | 3,4 °C               |
| Yliaaltojen vaikutus       | 3,0 °C                         | 2,3 °C             | 2,1 °C               |
| Epäsymmetrisyyden vaikutus | 5,9 °C                         | 2,2 °C             | 0,3 °C               |
| Oikosulkusuhteen vaikutus  | 4,0 °C                         | 0,9 °C             | 3,6 °C               |

Sähköiset ilmiöt vaikuttavat saataviin mittaustuloksiin muuttamalla taajuusmuuttajan toimintapistettä. Tuotekehityksessä tehdään usein vertailevia testejä ja juuri näitä testausmenetelmiä tulisi kehittää. Yksi mahdollisuus on käyttää omaa generaattorisyyttöä testattavalle laitteelle, jolloin syötön parametrit pysyvät vakiona testistä toiseen. Generaattorin ominaisuuksien tulisi olla mahdollisimman lähellä muuntajasyöttöä, jotta saatavat tulokset olisivat vertailukelpoisia keskenään. Generaattorin tehon tulisi olla suuri verrattuna testattavaan laitteeseen, jotta saavutettaisiin riittävä oikosulkusuhte testattavan laitteen ja generaattorin välille.

Käytettäessä generaattorisyyttöä halutaan usein säätää generaattorin lähtöjännitettä. Tällöin täytyy huomioida, että jännitteen muuttuessa myös generaattorin toimintapiste muuttuu, ja sen parametrit kuten induktanssi täytyy ottaa huomioon tuloksia analysoitaessa.

Yliaaltojen vaikutuksen mittauksista nähdään, ettei verkon yliaaltosisältöä voida määritellä yksiselitteisesti pelkästään verkon särökertoimen (THD) avulla. Erilaiset yliaaltotaajuudet vaikuttavat taajuusmuuttajan toimintaan toisistaan poikkeavasti, eikä tässä työssä tehtyjen mittausten perusteella voida tehdä luotettavia johtopäätöksiä yliaalloista aiheutuvista muutosilmiöistä. Tämän työn tuloksista nähdään, että passiiviset ja aktiiviset tulosillat vaikuttavat toisistaan poikkeavasti verkon muihin taajuusmuuttajakuoriin.

Erilaisia verkko-olosuhteita tulisi testata simuloimalla. Yksittäisten yliaaltokomponenttien vaikutus saadaan näkyviin paremmin simuloimalla, koska tällöin voidaan olla varmoja siitä, että käsitellään vain yhtä muuttujaa kerrallaan. Simulointitulosten perusteella todellisella laitteella tehtäviä testejä voitaisiin vähentää, jolloin testauskapasiteettia saataisiin vapautettua.



## 9 Yhteenveto

Työssä on käsitelty erikseen lämpötilanmittausta sekä sähköisiä olosuhteita. Aiheet ovat sinällään toisistaan riippumattomia, mutta muodostavat yhdessä taajuusmuuttajan lämpenemätestin virhelähteet.

Lämpötilanmittauksen virheet toteutuvat lähes poikkeuksetta suuntaan, jossa anturi näyttää pintalämpötilan pienemmäksi kuin todellisuudessa. Tämä on huomattavaa, sillä käytetyt menetelmät antavat systemaattisesti liian matalia lämpötiloja. Lisäksi käytetty lämpötilojen tasaantumisen yksinkertaistettu malli lisää lämpötilojen poikkeamaa samaan suuntaan. Näin ollen mittaustuloksia analysoitaessa olisi tärkeää, että käytettävissä olisi tieto kiinnitystavasta, sekä mitattavan pinnan jäähdytystavasta.

Sähköisten suureiden muutokset vaikeuttavat erityisesti komponenttien vertailutestausta sekä muita testejä, joissa verkko-olosuhteiden tulisi pysyä mahdollisimman muuttumattomina testistä toiseen. Näissä testeissä laitteen syöttäminen oman erillisen generaattorin kautta muodostuu lähes välttämättömäksi testien vertailukelpoisuuden kannalta.

Työssä käsitelty alue on erittäin laaja. Tämä työ soveltuukin hyvin esiselvitykseksi jatkossa tehtävälle tutkimukselle. Työstä voidaan johtaa kolme erilaista pääteemaa, joissa lisätutkimus on tarpeellista. Ensimmäistä teemaa, sähköisen ympäristön vaikutusta on tässä työssä tutkittu mittauksin vain ACS350-laitteen tapauksessa. Mahdollisia testattavia laitteita on paljon, mutta olisi tärkeää tutkia ainakin tapaus, jossa testattava laite sisältää tulokuristimen. Toisena voidaan pitää lämpötilamittauksen toteuttamista, johon tämä työ tarjoaa hyvän lähestymisen. Lisätutkimusta vaatii ainakin kaupallisten anturien käyttöönotto mitattaessa lämpötiloja suoraan puolijohdekomponenteilta. Kolmas teema, jota ei olla tässä työssä käsitelty on komponenttien toleransseista aiheutuvat epävarmuudet. Tälle virhelähteelle olisi tärkeää määrittää suhteellinen suuruus verrattuna muihin testaustilanteiden epävarmuuksiin.

Jatkotutkimuksen kannalta osa-alueet riippuvat kiinteästi toisistaan. Tutkimuksen aloittaminen vaatii asiantuntemusta kaikista osa-alueista. Lämpenemätestejä tehdessä syöttöverkon tunteminen on ratkaisevaa, jotta osataan vakioida oleelliset parametrit mittauksissa. Sähköisiä olosuhteita määritettäessä taajuusmuuttajan lämpötilakäyttäytymisen tunteminen on oleellista, jotta tiedetään millaisia verkko-olosuhteita ollaan hakemassa. Mittausten syöttöverkkona tulisi käyttää normaalia käyttöolosuhdetta laitteelle. Testaaminen mahdollisimman ideaalisella sinimuotoisella syötöllä ei vastaa normaalia käyttöolosuhdetta.

Taajuusmuuttajia käytetään hyvin erilaisissa verkko-olosuhteissa, eikä missään määritellä pahimpia mahdollisia olosuhteita. Standardeissa määritellään rajoja, muttei määritellä tilastollisesti todennäköisiä verkko-olosuhteita. Testatessa tulee tietää millaisiin verkko-olosuhteisiin laitetta tullaan myymään, jotta tehtävät testit varmistavat laitteen toiminnan käyttökohteiden sähköisesti huonoimmissa olosuhteissa.

Yhteenvedona voidaan todeta, että mittausepävarmuuksista aiheutuvat virhekomponentit ovat ongelma vain kun tuloksia halutaan verrata toisiinsa. Jos tulosten perusteella tullaan tekemään ratkaisevia johtopäätöksiä, tulee niiden olla riittävän luotettavia. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että kiinnityksen epäideaalisuudet aiheuttavat liian pieniä mittaustuloksia verrattuna todelliseen lämpötilaan.

## Viitteet

- [1] Agilent Technologies *Practical temperature measurements* Application note 290, U.S.A, 2000, 32 s.
- [2] ASTM STP 470 *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement* ASTM International, Special Technical Report, Philadelphia, 1970, 249 s.
- [3] Casanellas, F. *Losses in PWM Inverters Using IGBTs* IEE Proceedings, 1994, s. 235-239.
- [4] EA 4/02 *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration* European co-operation for Accreditation, 1999, 78 s.
- [5] Halasz, S., Huu, B.T. *Two-phase PWM technique for inverter fed AC drive* IECON, 1997, s. 688-693.
- [6] IEC 61000-2-1 *Description of the environment - Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems* IEC Technical Report, Geneve, 1990, 52 s.
- [7] IEC 61000-2-4 *Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances* IEC Basic EMC Publication, Geneve, 2002, 78 s.
- [8] IEC 61000-2-6 *Environment - Section 6: Assessment of the emission levels in the power supply of industrial plants as regards low frequency conducted disturbances* IEC Technical Report, Geneve, 1995, 120 s.
- [9] IEC 61000-3-4 *Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A* IEC Technical Report, Geneve, 1998, 32 s.
- [10] Ikonen, E., Lehto, A., Wallin, P., Äijälä, A. *Anturitekniikan perusteita* Espoo, Teknillinen korkeakoulu, 2000, 250 s.
- [11] Kyyrä, J. *Suuntaajatekniikka* Espoo, Teknillinen korkeakoulu, 2007, 320 s.
- [12] Luomi, J., Niiranen, J., Niemenmaa, A. *Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt* Luentomoniste, 1. osa, Teknillinen Korkeakoulu, Espoo, 2007, 165 s.
- [13] Mohan, N., Undeland, T.M. ja Robbins, W.P. *Power electronics - Converters, Applications and Design* 2003, 3. painos, 802 s.
- [14] Niiranen, J. *Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus* Espoo, Teknillinen korkeakoulu, 1999, 379 s.
- [15] Niiranen, J. *Tehoelektroniikan komponentit* Espoo, Teknillinen korkeakoulu, 2001, 234 s.

- [16] NIST Monograph 175, *Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90*, National Institute of Standards and Technology, Washington, D.C., 1993, 630 s.
- [17] Pinho, P. *Efficiency of a Voltage Sources Inverter with Controllable Intermediate DC-Voltage* Diplomityö, Espoo, 2002, 108 s.
- [18] Schmidt, E. *VDI-Wasserdampf tafeln* Ausgabe B, Springer, Berlin, 1963, 151 s.
- [19] Väätäinen, T. *Minimization of Losses in Frequency Converters* Diplomityö, Espoo, 2002, 85 s.

## Liite A: Lämpenemätestien selitykset

Liitteessä on esitelty lämpötilanmittauksen anturipaikat sekä sähköisten testien kuvaukset.

Taulukossa A1 on selvitetty käytetyt anturien kiinnityskohdat. Jäähdytyslementin kiinnityskohdat on esitelty erikseen kuvassa A1. Anturit porattiin jäähdytyslementin pohjan läpi siten, että anturi mittaa case-lämpötilaa puolijohteen kohdalta.

Työn aikana tehtiin yhteensä 25 erilaista lämpenemätestiä. Testien selitykset on koottu omaksi kokonaisuudekseen:

**Testi 1** Ensimmäinen syöttöjännitteen vaikutuksen testeistä. Syöttönä käytettiin 800 kVA:n generaattoria. Testin syöttöjännite 380 V, testilaitteen moottorin taajuus 50 Hz.

**Testi 2** Syöttönä käytettiin 800 kVA:n generaattoria. Testin syöttöjännite 380 V ja testilaitteen moottorin taajuus 25 Hz.

**Testi 3** Kuten testi 1, mutta syöttöjännitteellä 400 V.

**Testi 4** Kuten testi 2, mutta syöttöjännitteellä 400 V.

**Testi 5** Kuten testi 1, mutta syöttöjännitteellä 420 V.

**Testi 6** Kuten testi 2, mutta syöttöjännitteellä 420 V.

**Testi 7** Kuten testi 1, mutta syöttöjännitteellä 480 V.

**Testi 8** Kuten testi 2, mutta syöttöjännitteellä 480 V.

**Testi 9** Kuten testi 1, mutta syöttöjännitteellä 500 V.

**Testi 10** Kuten testi 2, mutta syöttöjännitteellä 500 V.

**Testi 11** Ensimmäinen jänniteylialtojen vaikutuksen testeistä. Syöttönä käytettiin 800 kVA:n generaattoria. Generaattorin kuormituksena lisäksi n. 120 kW diodisilta. Syöttöjännite 400 V ja testilaitteen moottorin taajuus 50 Hz.

**Testi 12** Syöttönä käytettiin 800 kVA:n generaattoria. Generaattorin kuormituksena lisäksi n. 120 kW diodisilta. Syöttöjännite 400 V ja testilaitteen moottorin taajuus 25 Hz.

**Testi 13** Kuten testi 11, mutta syöttöjännitteellä 500 V.

**Testi 14** Kuten testi 12, mutta syöttöjännitteellä 500 V.

**Testi 15** Testi vajaalla kuormituksella 800 kVA:n generaattorisytössä.

**Testi 16** Kuten testi 15, mutta generaattorin kuormituksena lisäksi n. 120 kW diodisilta.

**Testi 17** Ensimmäinen oikosulkusuhteen vaikutuksen testeistä. Syöttönä käytettiin 30 kVA:n generaattoria. Syöttöjännite 400 V ja testilaitteen moottorin taajuus 25 Hz.

**Testi 18** Testi laboratorion syöttöverkossa normaalissa verkon käyttötilanteessa.

**Testi 19** Testi mahdollisimman kuormittamattomassa laboratorioverkossa.

**Testi 20** Laboratorioverkossa kuormana lisäksi n. 300 kW diodisilta 400 voltin jänniteportaassa sekä verkkosuuntaaja 500 voltin jänniteportaassa, jolla teho syötetään takaisin verkkoon. Jänniteportaiden välillä on säästömuuntaja.

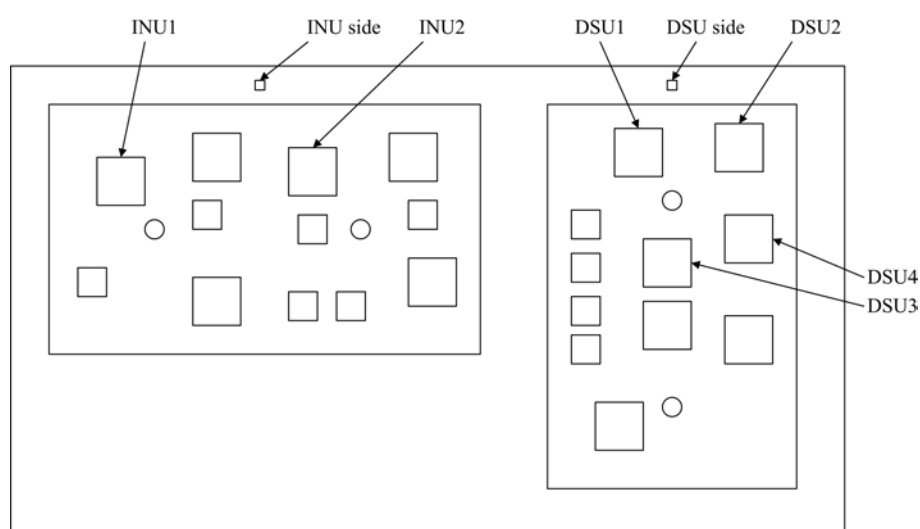
**Testi 21** Laboratorioverkossa kuormana tyhjäkäynnissä oleva verkkosuuntaaja 500 voltin jänniteportaaseen kytkettynä.

**Testi 22** Kuten testi 19.

**Testi 23** Syöttönä 800 kVA:n generaattori, jonka kuormituksena oli lisäksi n. 80 kW verkkosuuntaaja. Verkkosuuntaajan DC-jännite oli nostettu 770 volttiin.

**Testi 24** Syöttönä 800 kVA:n generaattori ja syöttöpuolella testattavan laitteen optiokuristin.

**Testi 25** Kuten testi 25, mutta kuristimen U-vaihe oikosuljettu.



Kuva A1: Lämpötila-anturien paikat ACS350-laitteen jäähdytyslementissä

Taulukko A1: Lämpötilanmittauksen anturien kiinnityskohdat

| Lyhenne  | Selite  |
|----------|---|
| C1       | Tasajännittekondensaattorin 1 pinta               |
| C2       | Tasajännittekondensaattorin 2 pinta               |
| C3       | Tasajännittekondensaattorin 3 pinta               |
| C4       | Tasajännittekondensaattorin 4 pinta               |
| C5       | Tasajännittekondensaattorin 5 pinta               |
| C6       | Tasajännittekondensaattorin 6 pinta               |
| C7       | Tasajännittekondensaattorin 7 pinta               |
| C8       | Tasajännittekondensaattorin 8 pinta               |
|          |   |
| FET      | FET-transistorin pinta                            |
| Shunt    | Shunt-vastuksen pinta                             |
|          |   |
| DSU side | Jäähdytyslementin pinta tasasuuntaajan vieressä   |
| INU side | Jäähdytyslementin pinta vaihtosuuntaajan vieressä |
|          |   |
| DSU1     | Tasasuuntaajan case-lämpötila 1                   |
| DSU2     | Tasasuuntaajan case-lämpötila 2                   |
| DSU3     | Tasasuuntaajan case-lämpötila 3                   |
| DSU4     | Tasasuuntaajan case-lämpötila 4                   |
|          |   |
| INU1     | Invertterin case-lämpötila 1                      |
| INU2     | Invertterin case-lämpötila 2                      |
|          |   |
| Air in   | Ympäristölämpötila                                |

## Liite B: Mittaustulokset

Tähän liitteeseen on koottu kaikki työn mittaustulokset.

Yhteenvedot tehdyistä testeistä on koottu taulukoihin B1-B5. Työssä käytetyt lämpötilanmittaustulokset on tasajännitekondensaattorin osalta saatu kondensaattorin 7 tuloksista. Tasasuuntaajan lämpötilat on saatu DSU1:n tuloksista ja vaihtosuuntaajan lämpötilat INU1:n tuloksista.

Taulukoissa B6-B8 on esitelty täydelliset lämpötilanmittaustulokset tehdyistä mitauksista.



Taulukko B1: Yhteenveto testeistä 1-5

| Testi             |            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Syöttö            |            |       |       |       |       |       |
| Jännite (V)       | L12        | 380,3 | 380,5 | 400,6 | 400,4 | 420,5 |
|                   | L23        | 380   | 380,3 | 400,3 | 400,2 | 420,3 |
|                   | L31        | 380   | 380,4 | 400,4 | 400,3 | 420,3 |
| Virta (A)         | L12        | 51,0  | 29,0  | 48,3  | 28,0  | 47,0  |
|                   | L23        | 51,0  | 29,0  | 48,0  | 27,9  | 46,0  |
|                   | L31        | 51,0  | 29,0  | 49,0  | 27,9  | 47,0  |
| $U_{THD}$ (%f)    | L12        | 3,8   | 2,5   | 3,5   | 2,3   | 3,3   |
|                   | L23        | 3,8   | 2,5   | 3,5   | 2,3   | 3,3   |
|                   | L31        | 3,9   | 2,6   | 3,6   | 2,4   | 3,4   |
| $I_{THD}$ (%f)    | L12        | 94,7  | 111,5 | 97,6  | 114,1 | 100,1 |
|                   | L23        | 95,7  | 112,3 | 98,5  | 114,8 | 101,1 |
|                   | L31        | 95,4  | 112,0 | 98,2  | 114,6 | 100,8 |
| DC-jännite (V)    |            | 522,6 | 529,5 | 551,9 | 558,3 | 580,5 |
| Lähtö (Mitattu)   |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         | perusaalto | 43,9  | 40    | 42,4  | 40,1  | 40,6  |
| Virta (A)         | RMS        | 44,3  | 40,5  | 42,5  | 39,8  | 41    |
| Teho (kW)         | perusaalto | 23,6  | 12,1  | 23,5  | 12,1  | 23,4  |
| Teho (kW)         | RMS        | 23,8  | 12,3  | 23,5  | 12,1  | 23,5  |
| Lähtöjännite (V)  | perusaalto | 358   | 206   | 378,4 | 205,5 | 398,9 |
| Lähtöjännite (V)  | RMS        | 400,8 | 299,6 | 422,4 | 306,4 | 446,2 |
| Lähtö (ACS350)    |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         |            | 44,2  | 40,8  | 42,4  | 40,7  | 41,1  |
| Teho (kW)         |            | 23,4  | 11,6  | 23,4  | 11,6  | 23,3  |
| DC jännite (V)    |            | 524,4 | 531,0 | 553,7 | 559,8 | 582,5 |
| Momentti (%)      |            | 103,6 | 102,3 | 103,3 | 102,2 | 103,2 |
| Lämpötilat        |            |       |       |       |       |       |
| DC-kondensaattori |            | 41,3  | 36,5  | 40,7  | 36,4  | 40,3  |
| Tasasuuntaaja     |            | 64,6  | 52,9  | 62,8  | 53,0  | 61,1  |
| Vaihtosuuntaaja   |            | 84,3  | 77,6  | 82,1  | 79,0  | 80,9  |
| Tuloilma          |            | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    |

Taulukko B2: Yhteenveto testeistä 6-10

| Testi             |            | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Syöttö            |            |       |       |       |       |       |
| Jännite (V)       | L12        | 420,4 | 480,4 | 480,4 | 500,4 | 500,3 |
|                   | L23        | 420,2 | 480,1 | 480,1 | 500,1 | 500,1 |
|                   | L31        | 420,3 | 480,3 | 480,2 | 500,2 | 500,2 |
| Virta (A)         | L12        | 27,0  | 42,0  | 24,0  | 41,0  | 24,0  |
|                   | L23        | 27,0  | 42,0  | 24,0  | 41,0  | 24,0  |
|                   | L31        | 27,0  | 42,0  | 24,0  | 41,0  | 23,7  |
| $U_{THD}$ (%f)    | L12        | 2,2   | 2,8   | 2,0   | 2,6   | 1,9   |
|                   | L23        | 2,2   | 2,7   | 1,9   | 2,6   | 1,9   |
|                   | L31        | 2,3   | 2,9   | 2,0   | 2,7   | 2,0   |
| $I_{THD}$ (%f)    | L12        | 116,6 | 107,1 | 123,6 | 109,1 | 125,7 |
|                   | L23        | 117,3 | 107,8 | 123,9 | 109,8 | 126,0 |
|                   | L31        | 117,1 | 107,6 | 123,9 | 109,7 | 126,1 |
| DC-jännite (V)    |            | 587,1 | 667,4 | 673,6 | 692,1 | 701,7 |
| Lähtö (Mitattu)   |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         | perusaalto | 39,8  | 41,3  | 40,8  | 41,2  | 40,8  |
| Virta (A)         | RMS        | 40    | 41,6  | 41,2  | 41,5  | 41,3  |
| Teho (kW)         | perusaalto | 12,1  | 23,7  | 12,3  | 23,8  | 12,3  |
| Teho (kW)         | RMS        | 12,2  | 23,8  | 12,5  | 23,9  | 12,6  |
| Lähtöjännite (V)  | perusaalto | 205,8 | 399,6 | 204,9 | 400   | 204,9 |
| Lähtöjännite (V)  | RMS        | 313,3 | 475,6 | 333   | 484   | 339,1 |
| Lähtö (ACS350)    |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         |            | 40,7  | 41,0  | 41,0  | 41,2  | 41,0  |
| Teho (kW)         |            | 11,6  | 23,0  | 11,6  | 23,4  | 11,6  |
| DC jännite (V)    |            | 588,5 | 670,3 | 676,7 | 698,8 | 705,5 |
| Momentti (%)      |            | 102,2 | 102,9 | 103,0 | 103,4 | 103,0 |
| Lämpötilat        |            |       |       |       |       |       |
| DC-kondensaattori |            | 36,4  | 40,6  | 36,2  | 40,6  | 36,0  |
| Tasasuuntaaja     |            | 52,9  | 61,3  | 53,1  | 61,1  | 53,2  |
| Vaihtosuuntaaja   |            | 80,4  | 89,2  | 84,7  | 89,8  | 86,0  |
| Tuloilma          |            | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    |

Taulukko B3: Yhteenvedo testeistä 11-15

| Testi             |            | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Syöttö            |            |       |       |       |       |       |
| Jännite (V)       | L12        | 401,1 | 401,2 | 501   | 501   | 400,4 |
|                   | L23        | 400,4 | 400,5 | 500,4 | 500,4 | 400,1 |
|                   | L31        | 400,1 | 400,3 | 500,3 | 500,4 | 400,2 |
| Virta (A)         | L12        | 53,0  | 30,0  | 43,0  | 25,0  | 38,0  |
|                   | L23        | 50,0  | 28,0  | 41,0  | 23,0  | 38,0  |
|                   | L31        | 51,0  | 28,0  | 41,8  | 23,0  | 38,0  |
| $U_{THD}$ (%f)    | L12        | 6,8   | 6,6   | 5,2   | 5,0   | 2,9   |
|                   | L23        | 6,9   | 6,7   | 5,3   | 5,1   | 2,9   |
|                   | L31        | 7,1   | 6,9   | 5,4   | 5,2   | 3,0   |
| $I_{THD}$ (%f)    | L12        | 100,2 | 114,6 | 107,1 | 120,5 | 103,9 |
|                   | L23        | 98,4  | 112,4 | 105,3 | 118,9 | 104,7 |
|                   | L31        | 100,2 | 115,0 | 107,8 | 122,1 | 104,4 |
| DC-jännite (V)    |            | 533,0 | 536,0 | 672,8 | 677,4 | 554,2 |
| Lähtö (Mitattu)   |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         | perusaalto | 44,3  | 40,8  | 41,4  | 40,8  | 33,7  |
| Virta (A)         | RMS        | 44,6  | 40,9  | 41,4  | 41    | 33,8  |
| Teho (kW)         | perusaalto | 24,1  | 12,4  | 23,8  | 12,4  | 17,9  |
| Teho (kW)         | RMS        | 24    | 12,5  | 23,9  | 12,6  | 18,1  |
| Lähtöjännite (V)  | perusaalto | 365   | 205,8 | 400   | 204,9 | 380,3 |
| Lähtöjännite (V)  | RMS        | 408,5 | 301,6 | 476,3 | 334,4 | 423,7 |
| Lähtö (ACS350)    |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         |            | 43,6  | 40,6  | 41,0  | 40,8  | 33,4  |
| Teho (kW)         |            | 23,5  | 11,6  | 23,4  | 11,7  | 17,9  |
| DC jännite (V)    |            | 534,3 | 538,5 | 676,7 | 680,1 | 556,1 |
| Momentti (%)      |            | 103,8 | 102,4 | 103,5 | 103,3 | 79,1  |
| Lämpötilat        |            |       |       |       |       |       |
| DC-kondensaattori |            | 42,4  | 37,1  | 41,0  | 36,4  | 37,1  |
| Tasasuuntaaja     |            | 64,4  | 53,1  | 61,7  | 53,5  | 52,5  |
| Vaihtosuuntaaja   |            | 82,5  | 76,9  | 88,5  | 84,1  | 65,7  |
| Tuloilma          |            | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    |

Taulukko B4: Yhteenveto testeistä 16-20

| Testi             |            | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Syöttö            |            |       |       |       |       |       |
| Jännite (V)       | L12        | 401,5 | 394,6 | 417,5 | 414,2 | 406,3 |
|                   | L23        | 400,8 | 394,1 | 418,5 | 415,6 | 407,1 |
|                   | L31        | 400,6 | 393,9 | 418,8 | 415,6 | 408,5 |
| Virta (A)         | L12        | 39,0  | 19,0  | 48,2  | 49,9  | 51,0  |
|                   | L23        | 40,2  | 20,0  | 49,2  | 50,3  | 49,2  |
|                   | L31        | 39,0  | 19,0  | 48,8  | 50,0  | 51,6  |
| $U_{THD}$ (%f)    | L12        | 6,6   | 12,4  | 5,7   | 2,6   | 7,0   |
|                   | L23        | 6,7   | 12,8  | 5,7   | 2,6   | 7,0   |
|                   | L31        | 6,9   | 12,7  | 5,7   | 2,5   | 7,0   |
| $I_{THD}$ (%f)    | L12        | 104,8 | 25,8  | 103,9 | 111,6 | 103,6 |
|                   | L23        | 105,9 | 25,8  | 102,9 | 108,7 | 100,1 |
|                   | L31        | 106,3 | 25,6  | 102,8 | 109,4 | 98,5  |
| DC-jännite (V)    |            | 535,3 | 511,7 | 572,5 | 567,3 | 540,9 |
| Lähtö (Mitattu)   |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         | perusaalto | 34,3  | 40,7  | 41,7  | 42,3  | 43,4  |
| Virta (A)         | RMS        | 34,2  | 41    | 41,7  | 42,6  | 43,3  |
| Teho (kW)         | perusaalto | 18,1  | 12,3  | 23,8  | 23,8  | 24    |
| Teho (kW)         | RMS        | 18    | 12,3  | 23,9  | 23,8  | 24    |
| Lähtöjännite (V)  | perusaalto | 367,2 | 205,6 | 391,6 | 388,8 | 370   |
| Lähtöjännite (V)  | RMS        | 410,6 | 294,7 | 437,8 | 435,3 | 414,3 |
| Lähtö (ACS350)    |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         |            | 33,9  | 40,5  | 41,4  | 41,4  | 42,9  |
| Teho (kW)         |            | 17,8  | 11,6  | 23,4  | 23,4  | 23,4  |
| DC jännite (V)    |            | 536,7 | 513,7 | 574,0 | 572,4 | 541,6 |
| Momentti (%)      |            | 78,9  | 102,2 | 103,5 | 103,5 | 103,5 |
| Lämpötilat        |            |       |       |       |       |       |
| DC-kondensaattori |            | 38,1  | 32,4  | 41,4  | 42,7  | 40,4  |
| Tasasuuntaaja     |            | 53,6  | 52,1  | 61,7  | 62,3  | 63,3  |
| Vaihtosuuntaaja   |            | 66,2  | 75,4  | 79,6  | 80,3  | 81,3  |
| Tuloilma          |            | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    |

Taulukko B5: Yhteenvedo testeistä 21-25

| Testi             |            | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    |
|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Syöttö            |            |       |       |       |       |       |
| Jännite (V)       | L12        | 396,4 | 396,9 | 401,8 | 400,2 | 403,9 |
|                   | L23        | 397,1 | 398,1 | 401,1 | 400,2 | 396,2 |
|                   | L31        | 397,6 | 398,4 | 401,3 | 400,3 | 397,8 |
| Virta (A)         | L12        | 52,4  | 52,0  | 48,0  | 38,0  | 48,0  |
|                   | L23        | 52,6  | 52,0  | 48,0  | 38,0  | 50,0  |
|                   | L31        | 52,9  | 52,0  | 47,1  | 38,0  | 30,0  |
| $U_{THD}$ (%f)    | L12        | 5,9   | 2,5   | 4,3   | 9,0   | 6,1   |
|                   | L23        | 5,8   | 2,6   | 4,3   | 8,9   | 9,8   |
|                   | L31        | 5,8   | 2,5   | 4,4   | 8,9   | 5,7   |
| $I_{THD}$ (%f)    | L12        | 106,7 | 109,5 | 93,3  | 39,8  | 73,1  |
|                   | L23        | 106,0 | 106,7 | 94,5  | 40,1  | 50,0  |
|                   | L31        | 105,3 | 107,0 | 93,9  | 39,9  | 68,9  |
| DC-jännite (V)    |            | 541,8 | 545,3 | 550,0 | 528,2 | 536,8 |
| Lähtö (Mitattu)   |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         | perusaalto | 43,4  | 42,8  | 42,6  | 44,2  | 44,2  |
| Virta (A)         | RMS        | 43,6  | 43,3  | 43,3  | 44,2  | 44    |
| Teho (kW)         | perusaalto | 23,9  | 23,8  | 23,7  | 23,9  | 24    |
| Teho (kW)         | RMS        | 24,1  | 24,1  | 24    | 23,9  | 24    |
| Lähtöjännite (V)  | perusaalto | 370,6 | 373,6 | 379,3 | 363,3 | 365,4 |
| Lähtöjännite (V)  | RMS        | 415   | 418   | 422   | 405,9 | 408,8 |
| Lähtö (ACS350)    |            |       |       |       |       |       |
| Virta (A)         |            | 43,2  | 42,7  | 42,3  | 43,6  | 43,4  |
| Teho (kW)         |            | 23,5  | 23,4  | 23,4  | 23,5  | 23,4  |
| DC jännite (V)    |            | 542,1 | 547,5 | 554,7 | 530,3 | 539,0 |
| Momentti (%)      |            | 103,9 | 103,7 | 103,6 | 103,8 | 103,7 |
| Lämpötilat        |            |       |       |       |       |       |
| DC-kondensaattori |            | 42,7  | 42,9  | 39,9  | 31,0  | 36,9  |
| Tasasuuntaaja     |            | 63,2  | 63,7  | 62,1  | 61,7  | 60,1  |
| Vaihtosuuntaaja   |            | 81,0  | 81,5  | 80,4  | 80,7  | 81,5  |
| Tuloilma          |            | 25    | 25    | 25    | 25    | 25    |

Taulukko B6: Lämpötilanmittaustulokset testeistä 1-10

| Testi    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| C1       | 32,7 | 29,0 | 32,5 | 28,8 | 32,3 | 28,9 | 32,3 | 28,7 | 32,7 | 29,5 |
| C2       | 32,1 | 28,5 | 31,8 | 28,3 | 31,7 | 28,3 | 31,5 | 28,1 | 31,8 | 28,8 |
| C3       | 35,5 | 30,9 | 35,2 | 30,8 | 34,9 | 30,8 | 34,8 | 30,5 | 35,2 | 31,3 |
| C4       | 33,0 | 29,3 | 32,8 | 29,1 | 32,5 | 29,1 | 32,3 | 28,7 | 32,6 | 29,5 |
| C5       | 34,5 | 30,4 | 34,3 | 30,2 | 34,0 | 30,2 | 33,9 | 29,9 | 34,3 | 30,7 |
| C6       | 36,5 | 31,7 | 36,1 | 31,5 | 35,7 | 31,5 | 35,5 | 31,1 | 35,9 | 31,8 |
| C7       | 38,2 | 33,1 | 37,9 | 33,0 | 37,5 | 33,0 | 37,5 | 32,7 | 37,9 | 33,4 |
| C8       | 35,2 | 30,9 | 34,9 | 30,8 | 34,5 | 30,8 | 34,2 | 30,3 | 34,6 | 31,1 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| FET      | 34,1 | 31,9 | 34,6 | 32,4 | 34,7 | 33,0 | 36,2 | 34,7 | 37,4 | 36,3 |
| Shunt    | 48,3 | 38,3 | 46,8 | 38,1 | 45,5 | 38,0 | 44,6 | 37,7 | 44,9 | 38,6 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| DSU side | 51,7 | 43,8 | 50,7 | 43,9 | 49,6 | 44,0 | 49,9 | 44,3 | 50,4 | 45,4 |
| INU side | 61,0 | 56,8 | 59,8 | 57,5 | 59,0 | 58,4 | 63,4 | 60,7 | 64,4 | 62,5 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| DSU1     | 61,5 | 49,6 | 59,9 | 49,5 | 58,3 | 49,5 | 58,1 | 49,6 | 58,4 | 50,6 |
| DSU2     | 59,8 | 47,1 | 58,2 | 46,9 | 56,5 | 46,7 | 55,6 | 46,4 | 55,7 | 47,3 |
| DSU3     | 60,3 | 48,0 | 58,8 | 47,9 | 57,2 | 47,8 | 56,6 | 47,7 | 56,8 | 48,6 |
| DSU4     | 59,8 | 46,8 | 58,3 | 46,6 | 56,7 | 46,4 | 55,5 | 46,0 | 55,6 | 46,9 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| INU1     | 81,2 | 74,2 | 79,2 | 75,6 | 78,1 | 77,0 | 86,0 | 81,2 | 87,1 | 83,5 |
| INU2     | 78,9 | 72,6 | 76,8 | 73,7 | 75,6 | 74,9 | 83,0 | 78,7 | 84,1 | 80,9 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Air in   | 21,9 | 21,6 | 22,1 | 21,5 | 22,2 | 21,5 | 21,8 | 21,5 | 22,3 | 22,4 |

Taulukko B7: Lämpötilanmittaustulokset testeistä 11-20

| Testi    | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| C1       | 33,1 | 29,2 | 32,3 | 29,0 | 30,2 | 31,2 | 25,9 | 33,3 | 33,4 | 34,2 |
| C2       | 32,4 | 28,7 | 31,5 | 28,4 | 29,6 | 30,6 | 25,6 | 32,5 | 32,7 | 33,7 |
| C3       | 36,0 | 31,2 | 34,9 | 30,9 | 32,2 | 33,3 | 27,1 | 36,0 | 36,4 | 36,9 |
| C4       | 33,3 | 29,5 | 32,3 | 29,1 | 30,1 | 31,2 | 26,2 | 33,1 | 33,3 | 34,3 |
| C5       | 35,1 | 30,7 | 34,1 | 30,4 | 31,6 | 32,7 | 26,9 | 34,9 | 35,3 | 35,9 |
| C6       | 37,2 | 32,1 | 35,8 | 31,5 | 32,8 | 34,0 | 27,9 | 36,8 | 37,3 | 37,9 |
| C7       | 39,0 | 33,5 | 37,7 | 33,1 | 34,5 | 35,6 | 28,9 | 38,7 | 39,2 | 39,5 |
| C8       | 35,6 | 31,2 | 34,5 | 30,8 | 31,8 | 33,0 | 27,6 | 35,1 | 35,4 | 36,1 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| FET      | 34,4 | 32,2 | 37,0 | 35,5 | 32,7 | 33,1 | 31,8 | 34,9 | 34,6 | 35,8 |
| Shunt    | 48,3 | 38,6 | 45,1 | 38,4 | 39,4 | 40,6 | 36,9 | 46,4 | 46,3 | 49,2 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| DSU side | 51,6 | 44,0 | 50,5 | 45,0 | 43,3 | 44,3 | 43,1 | 50,1 | 50,1 | 52,7 |
| INU side | 60,7 | 57,1 | 64,0 | 61,5 | 50,2 | 50,9 | 56,0 | 59,1 | 59,0 | 62,0 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| DSU1     | 61,0 | 49,5 | 58,5 | 50,2 | 49,9 | 51,1 | 48,6 | 59,0 | 58,9 | 62,3 |
| DSU2     | 59,1 | 46,9 | 55,9 | 46,9 | 48,5 | 49,8 | 46,1 | 57,1 | 57,1 | 60,3 |
| DSU3     | 60,0 | 48,2 | 57,0 | 48,4 | 49,0 | 50,4 | 47,0 | 57,7 | 57,6 | 60,5 |
| DSU4     | 59,6 | 47,0 | 56,0 | 46,8 | 48,7 | 50,2 | 45,9 | 57,4 | 57,3 | 60,2 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| INU1     | 79,1 | 73,3 | 85,2 | 80,8 | 63,0 | 63,7 | 71,9 | 76,9 | 76,8 | 80,3 |
| INU2     | 77,5 | 72,2 | 82,9 | 78,9 | 62,1 | 62,8 | 70,8 | 75,2 | 75,1 | 78,3 |
|          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Air in   | 21,6 | 21,4 | 21,8 | 21,7 | 22,4 | 22,5 | 21,5 | 22,3 | 21,6 | 24,0 |

Taulukko B8: Lämpötilanmittaustulokset testeistä 21-25

| Testi    | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   |
|----------|------|------|------|------|------|
|          |      |      |      |      |      |
| C1       | 34,5 | 34,2 | 32,4 | 25,9 | 29,9 |
| C2       | 33,9 | 33,6 | 31,9 | 25,8 | 29,4 |
| C3       | 37,6 | 37,3 | 35,0 | 27,0 | 31,9 |
| C4       | 34,4 | 34,2 | 32,4 | 26,3 | 29,9 |
| C5       | 36,4 | 36,2 | 34,1 | 26,9 | 31,3 |
| C6       | 38,5 | 38,3 | 35,9 | 28,0 | 32,9 |
| C7       | 40,5 | 40,2 | 37,5 | 28,7 | 34,2 |
| C8       | 36,6 | 36,3 | 34,3 | 27,7 | 31,7 |
|          |      |      |      |      |      |
| FET      | 35,1 | 35,0 | 34,9 | 33,8 | 34,3 |
| Shunt    | 48,6 | 48,1 | 46,9 | 44,3 | 45,9 |
|          |      |      |      |      |      |
| DSU side | 51,6 | 51,8 | 50,7 | 50,3 | 50,4 |
| INU side | 60,5 | 60,6 | 59,9 | 59,9 | 60,3 |
|          |      |      |      |      |      |
| DSU1     | 61,0 | 61,0 | 59,7 | 59,3 | 57,3 |
| DSU2     | 59,1 | 59,2 | 57,8 | 57,3 | 55,5 |
| DSU3     | 59,7 | 59,9 | 58,4 | 57,8 | 59,9 |
| DSU4     | 59,4 | 59,5 | 58,0 | 57,5 | 59,7 |
|          |      |      |      |      |      |
| INU1     | 78,8 | 78,8 | 77,9 | 78,4 | 78,7 |
| INU2     | 77,0 | 76,8 | 76,0 | 76,3 | 76,8 |
|          |      |      |      |      |      |
| Air in   | 22,8 | 22,3 | 22,5 | 22,6 | 22,2 |

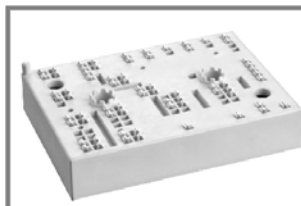


## Liite C: Tekniset ohjelehdet

Liitteeseen on koottu työssä testatun taajuusmuutteen pääpiirikomponenttien datalehdet. Tasasuuntaajan datalehdet ovat kuvissa C1-C4. Vaihtosuuntaajan datalehdet ovat kuvissa C5-C9.

Liitteessä on lisäksi termoparilangan tarkkuuden datalehti kuvassa C10 ja lämpötilanmittauslaitteen tarkkuuden datalehti kuvassa C11.

## SKiiP 39ANB16V1



MiniSKiiP® 3

3-phase bridge rectifier +  
brake chopper

SKiiP 39ANB16V1

### Features

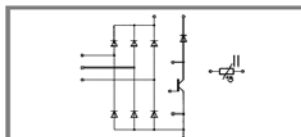
- Fast Trench IGBTs
- Robust and soft freewheeling diodes in CAL technology
- Highly reliable spring contacts for electrical connections
- UL recognised file no. E63532

### Typical Applications

- Input bridge for Inverter up to 45 kVA

### Remarks

- $V_{CEsat}$ ,  $V_F$  = chip level value



ANB

| Absolute Maximum Ratings  |  |              |                      |
|---|--|--------------|----------------------|
| $T_s = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified |  |              |                      |
| Symbol  | Conditions   | Values       | Units                |
| <b>IGBT - Inverter, Chopper</b>                                 |  |              |                      |
| $V_{CES}$   | $T_s = 25\text{ (70) }^{\circ}\text{C}$                                  | 1200         | V                    |
| $I_C$   |  | 157 (118)    | A                    |
| $I_{CRM}$   |  | 280          | A                    |
| $V_{GES}$   |  | $\pm 20$     | V                    |
| $T_J$   |  | -40 ... +150 | $^{\circ}\text{C}$   |
| <b>Diode - Inverter, Chopper</b>                                |  |              |                      |
| $I_F$   | $T_s = 25\text{ (70) }^{\circ}\text{C}$                                  | 167 (124)    | A                    |
| $I_{FRM}$   |  | 280          | A                    |
| $T_J$   |  | -40 ... +150 | $^{\circ}\text{C}$   |
| <b>Diode - Rectifier</b>  |  |              |                      |
| $V_{RRM}$   | $T_s = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$                                       | 1600         | V                    |
| $I_F$   |  | 124          | A                    |
| $I_{FSM}$   | $t_p = 10\text{ ms, sin } 180^{\circ}, T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 1600         | A                    |
| $i^2t$  | $t_p = 10\text{ ms, sin } 180^{\circ}, T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 14500        | $\text{A}^2\text{s}$ |
| $T_J$   |  | -40 ... +150 | $^{\circ}\text{C}$   |
| $I_{RMS}$   | per power terminal (20 A / spring)                                       | 160          | A                    |
| $T_{stg}$   |  | -40 ... +125 | $^{\circ}\text{C}$   |
| $V_{isol}$  | AC, 1 min.   | 2500         | V                    |

| Characteristics   |   |      |            |           |               |
|---|---|------|------------|-----------|---------------|
| $T_s = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified |   |      |            |           |               |
| Symbol  | Conditions  | min. | typ.       | max.      | Units         |
| <b>IGBT - Inverter, Chopper</b>                                 |   |      |            |           |               |
| $V_{CEsat}$   | $I_{Cnom} = 140\text{ A}, T_J = 25\text{ (125) }^{\circ}\text{C}$ |      | 1,7 (2)    | 2,1 (2,4) | V             |
| $V_{GE(th)}$  | $V_{GE} = V_{CE}, I_C = 6\text{ mA}$                              | 5    | 5,8        | 6,5       | V             |
| $V_{CE(TO)}$  | $T_J = 25\text{ (125) }^{\circ}\text{C}$                          |      | 1 (0,9)    | 1,2 (1,1) | V             |
| $r_T$   | $T_J = 25\text{ (125) }^{\circ}\text{C}$                          |      | 5 (7,9)    | 6,4 (9,3) | m $\Omega$    |
| $C_{ios}$   | $V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$     |      | 11,2       |           | nF            |
| $C_{oss}$   | $V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$     |      | 1,9        |           | nF            |
| $C_{res}$   | $V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$     |      | 1,5        |           | nF            |
| $R_{th(j-s)}$   | per IGBT  |      | 0,3        |           | K/W           |
| $t_{cl(on)}$  | under following conditions  |      | 80         |           | ns            |
| $t_r$   | $V_{CC} = 600\text{ V}, V_{GE} = \pm 15\text{ V}$                 |      | 40         |           | ns            |
| $t_{cl(off)}$   | $I_{Cnom} = 140\text{ A}, T_J = 125^{\circ}\text{C}$              |      | 500        |           | ns            |
| $t_f$   | $R_{Con} = R_{Coff} = 5\text{ }\Omega$                            |      | 100        |           | ns            |
| $E_{on}$  | inductive load  |      | 19,9       |           | mJ            |
| $E_{off}$   |   |      | 17,2       |           | mJ            |
| <b>Diode - Inverter, Chopper</b>                                |   |      |            |           |               |
| $V_F = V_{EC}$  | $I_{Fnom} = 140\text{ A}, T_J = 25\text{ (125) }^{\circ}\text{C}$ |      | 1,5 (1,5)  | 1,7 (1,7) | V             |
| $V_{(TO)}$  | $T_J = 25\text{ (125) }^{\circ}\text{C}$                          |      | 1 (0,8)    | 1,1 (0,9) | V             |
| $r_T$   | $T_J = 25\text{ (125) }^{\circ}\text{C}$                          |      | 3,6 (5)    | 4,3 (5,7) | m $\Omega$    |
| $R_{th(j-s)}$   | per diode   |      | 0,4        |           | K/W           |
| $I_{RRM}$   | under following conditions  |      | 210        |           | A             |
| $Q_{rr}$  | $I_{Fnom} = 140\text{ A}, V_R = 600\text{ V}$                     |      | 38         |           | $\mu\text{C}$ |
| $E_{rr}$  | $V_{GE} = 0\text{ V}, T_J = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$          |      | 16,2       |           | mJ            |
|   | $di_F/dt = 4300\text{ A}/\mu\text{s}$                             |      |            |           |               |
| <b>Diode - Rectifier</b>  |   |      |            |           |               |
| $V_F$   | $I_{Fnom} = 90\text{ A}, T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$        |      | 1,2        |           | V             |
| $V_{(TO)}$  | $T_J = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$                               |      | 0,8        |           | V             |
| $r_T$   | $T_J = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$                               |      | 4          |           | m $\Omega$    |
| $R_{th(j-s)}$   | per diode   |      | 0,5        |           | K/W           |
| <b>Temperature Sensor</b>                                       |   |      |            |           |               |
| $R_{ts}$  | 3 %, $T_r = 25\text{ (100) }^{\circ}\text{C}$                     |      | 1000(1670) |           | $\Omega$      |
| <b>Mechanical Data</b>  |   |      |            |           |               |
| w   |   |      | 95         |           | g             |
| $M_s$   | Mounting torque   | 2    |            | 2,5       | Nm            |

# SKiiP 39ANB16V1

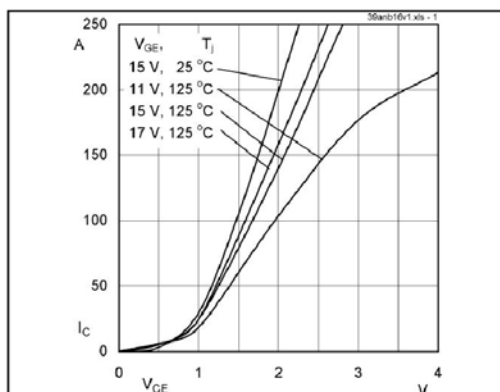


Fig. 1 Typ. output characteristic

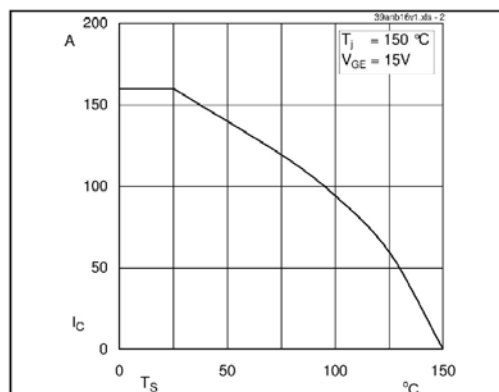


Fig. 2 Typ. rated current vs. temperature

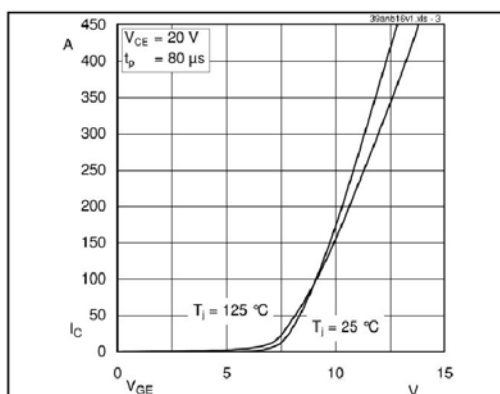


Fig. 3 Typ. transfer characteristic

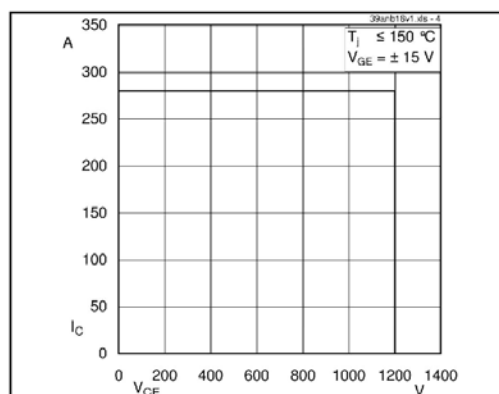
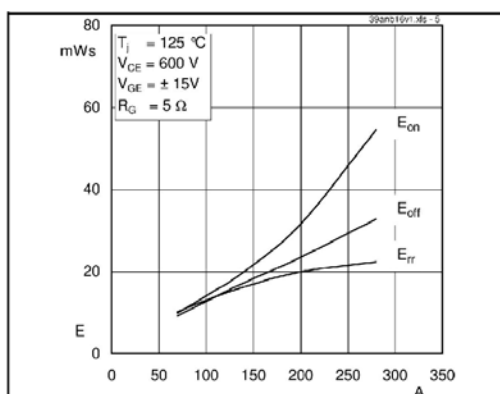
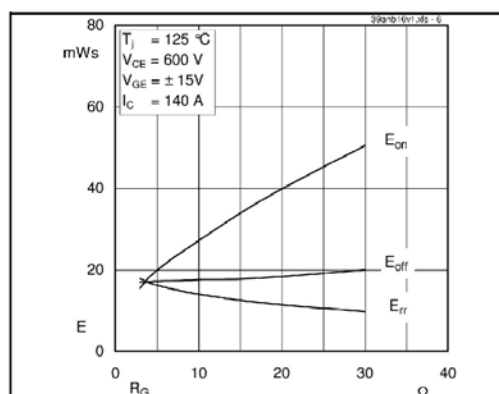
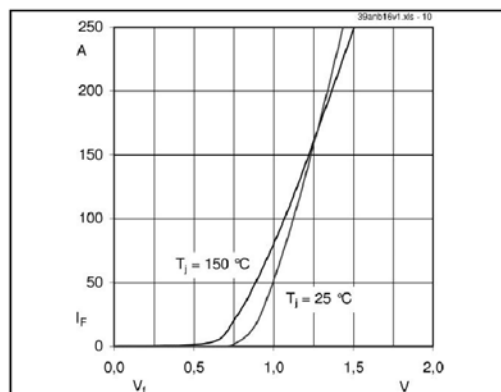
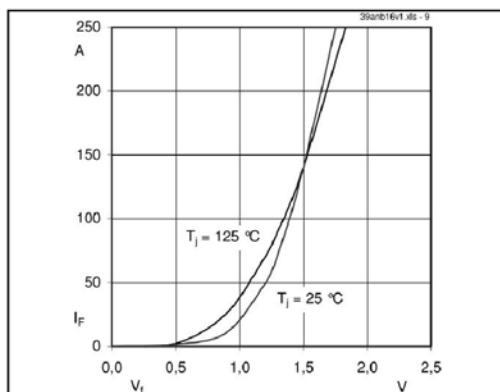
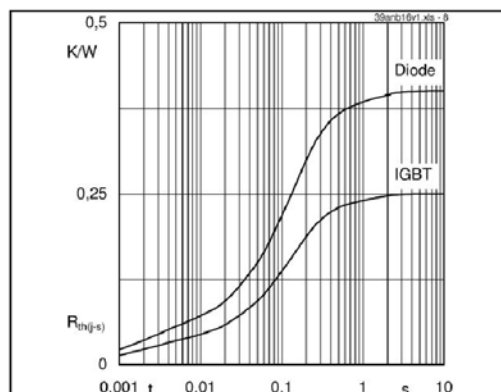
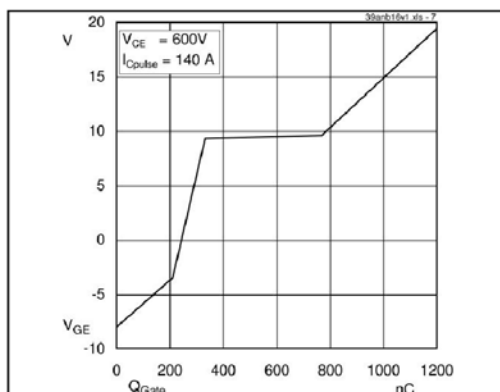
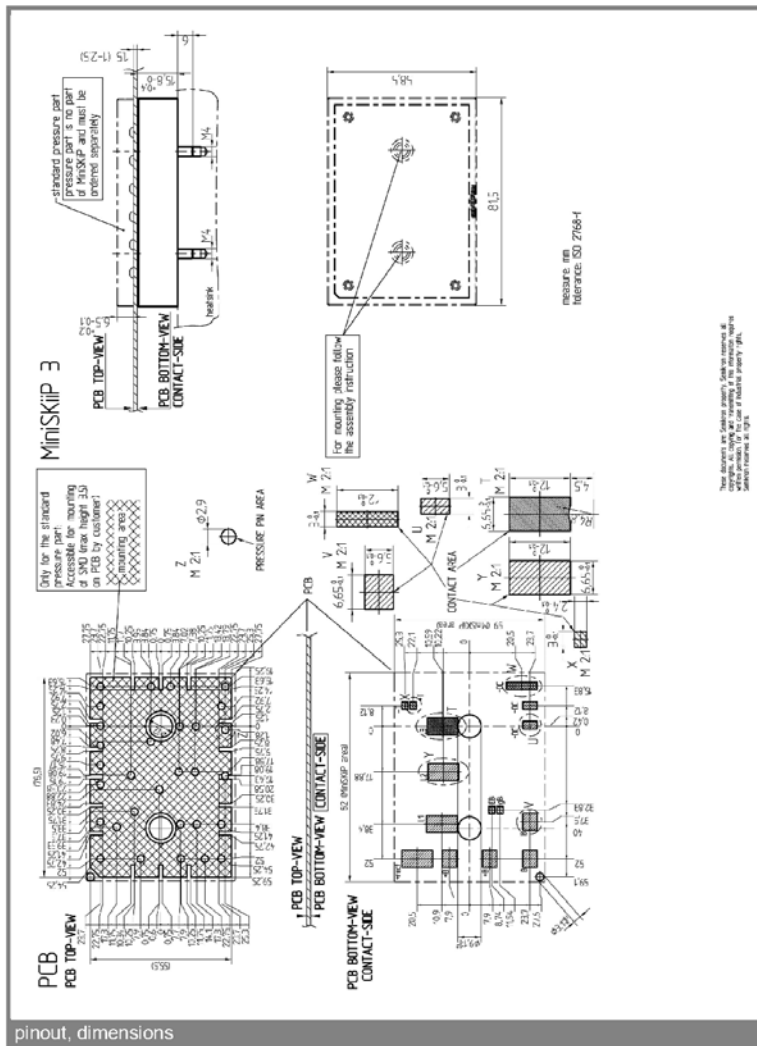


Fig. 4 Reverse bias safe operating area

Fig. 5 Typ. Turn-on /off energy =  $f(I_C)$ Fig. 6 Typ. Turn-on /off energy =  $f(R_G)$

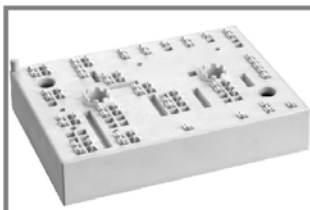
# SKiiP 39ANB16V1





This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

## SKiiP 38AC12T4V1



MiniSKiiP®3

### 3-phase bridge inverter

#### SKiiP 38AC12T4V1

#### Preliminary Data

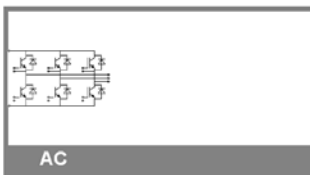
#### Features

- Trench 4 IGBT's
- Robust and soft freewheeling diodes in CAL technology
- Highly reliable spring contacts for electrical connections
- UL recognised file no. E63532

#### Typical Applications

#### Remarks

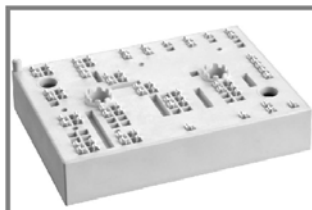
- Product reliability valid for  $T_J \leq 150^\circ\text{C}$
- For short circuit: Soft  $R_{\text{Goff}}$  recommended  $R_{\text{Goff}} > 20 \Omega$



| Absolute Maximum Ratings $T_s = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified |  |            |                  |
|--|--|------------|------------------|
| Symbol   | Conditions   | Values     | Units            |
| <b>IGBT</b>  |  |            |                  |
| $V_{\text{CES}}$   | $T_J = 25^\circ\text{C}$   | 1200       | V                |
| $I_C$  | $T_J = 175^\circ\text{C}$  | 115        | A                |
|  | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$T_c = 70^\circ\text{C}$   | 93         | A                |
| $I_{\text{CRM}}$   | $I_{\text{CRM}} = 3 \times I_{\text{Cnom}}$  | 300        | A                |
| $V_{\text{GES}}$   |  | $\pm 20$   | V                |
| $t_{\text{psc}}$   | $V_{\text{CC}} = 800 \text{ V}; V_{\text{GE}} \leq 15 \text{ V}; T_J = 150^\circ\text{C}$<br>$V_{\text{CES}} < 1200 \text{ V}$ | 10         | $\mu\text{s}$    |
| <b>Inverse Diode</b>   |  |            |                  |
| $I_F$  | $T_J = 175^\circ\text{C}$  | 99         | A                |
|  | $T_c = 25^\circ\text{C}$<br>$T_c = 70^\circ\text{C}$   | 79         | A                |
| $I_{\text{FRM}}$   | $I_{\text{CRM}} = 3 \times I_{\text{Cnom}}$  | 300        | A                |
| $t_{\text{FSM}}$   | $t_p = 10 \text{ ms}; \sin$  | 548        | A                |
| <b>Module</b>  |  |            |                  |
| $I_{\text{L(RMS)}}$  |  | 160        | A                |
| $T_{\text{vj}}$  |  | -40...+150 | $^\circ\text{C}$ |
| $T_{\text{stg}}$   |  | -40...+125 | $^\circ\text{C}$ |
| $V_{\text{isol}}$  | AC, 1 min.   | 2500       | V                |

| Characteristics $T_s = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified |  |      |      |          |
|---|--|------|------|----------|
| Symbol  | Conditions   | min. | typ. | max.     |
| <b>IGBT</b>   |  |      |      |          |
| $V_{\text{GE(th)}}$   | $V_{\text{GE}} = V_{\text{CE}}, I_C = 4 \text{ mA}$  | 5    | 5,8  | 6,5      |
| $I_{\text{CES}}$  | $V_{\text{GE}} = 0 \text{ V}, V_{\text{CE}} = V_{\text{CES}}, T_J = 25^\circ\text{C}$  |      |      | 0,3      |
| $V_{\text{CE0}}$  | $T_J = 25^\circ\text{C}$   |      | 0,8  | 0,9      |
|   | $T_J = 150^\circ\text{C}$  |      | 0,7  | 0,8      |
| $r_{\text{CE}}$   | $V_{\text{GE}} = 15 \text{ V}, T_J = 25^\circ\text{C}$   |      | 10   | 11       |
|   | $T_J = 150^\circ\text{C}$  |      | 15   | 16       |
| $V_{\text{CE(sat)}}$  | $I_{\text{Cnom}} = 100 \text{ A}, V_{\text{GE}} = 15 \text{ V}, T_J = 25^\circ\text{C}_{\text{chiplev.}}$                                  |      | 1,8  | 2        |
|   | $T_J = 150^\circ\text{C}_{\text{chiplev.}}$  |      | 2,2  | 2,4      |
| $C_{\text{ies}}$  | $V_{\text{CE}} = 25 \text{ V}, V_{\text{GE}} = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$   |      | 6,2  | nF       |
| $C_{\text{oes}}$  |  |      | 0,41 | nF       |
| $C_{\text{res}}$  |  |      | 0,35 | nF       |
| $Q_G$   | $V_{\text{GE}} = -8...+15 \text{ V}$   |      | 565  | nC       |
| $R_{\text{Clint}}$  | $T_J = 25^\circ\text{C}$   |      | 7,5  | $\Omega$ |
| $t_{\text{ol(on)}}$   | $R_{\text{Con}} = 1 \Omega, V_{\text{CC}} = 600 \text{ V}, I_C = 100 \text{ A}, T_J = 150^\circ\text{C}, V_{\text{GE}} = \pm 15 \text{ V}$ |      | 160  | ns       |
| $t_f$   |  |      | 45   | ns       |
| $E_{\text{on}}$   |  |      | 13,7 | mJ       |
| $t_{\text{ol(off)}}$  |  |      | 395  | ns       |
| $t_f$   |  |      | 73   | ns       |
| $E_{\text{off}}$  |  |      | 9,7  | mJ       |
| $R_{\text{th(j-s)}}$  | per IGBT   |      | 0,48 | K/W      |

## SKiiP 38AC12T4V1



MiniSKiiP®3

### 3-phase bridge inverter

#### SKiiP 38AC12T4V1

Preliminary Data

#### Features

- Trench 4 IGBT's
- Robust and soft freewheeling diodes in CAL technology
- Highly reliable spring contacts for electrical connections
- UL recognised file no. E63532

#### Typical Applications

#### Remarks

- Product reliability valid for  $T_j \leq 150^\circ\text{C}$
- For short circuit: Soft  $R_{\text{Goff}}$  recommended  $R_{\text{Goff}} > 20 \Omega$



| Characteristics    |   |  |      |      |      |       |
|--------------------|---|--|------|------|------|-------|
| Symbol             | Conditions                                      |  | min. | typ. | max. | Units |
| Inverse Diode      |   |  |      |      |      |       |
| $V_F = V_{EC}$     | $I_{From} = 100\text{ A}; V_{GE} = 15\text{ V}$ | $T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}_{chiplev.}$  |      | 2,2  | 2,5  | V     |
|                    |   | $T_j = 150\text{ }^{\circ}\text{C}_{chiplev.}$ |      | 2,1  | 2,45 | V     |
| $V_{F0}$           |   | $T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$             |      | 1,3  | 1,5  | V     |
|                    |   | $T_j = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$            |      | 0,9  | 1,1  | V     |
| $r_F$              |   | $T_j = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$             |      | 9    | 10   | mΩ    |
|                    |   | $T_j = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$            |      | 12   | 13,5 | mΩ    |
| $I_{RRM}$          | $I_F = 100\text{ A}$                            | $T_j = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$            |      | 112  |      | A     |
| $Q_{rr}$           | $di/dt = 2680\text{ A}/\mu\text{s}$             |  |      | 16   |      | μC    |
| $E_{rr}$           | $V_{GE} = \pm 15\text{V}$                       |  |      | 6,5  |      | mJ    |
| $R_{th(j-s)}$      | per diode                                       |  |      | 0,66 |      | K/W   |
| $M_s$              | to heat sink                                    |  | 2    |      | 2,5  | Nm    |
| w                  |   |  |      | 95   |      | g     |
| Temperature sensor |   |  |      |      |      |       |
| $R_{ts}$           | 3%, $Tr = 25^{\circ}\text{C}$                   |  |      | 1000 |      | Ω     |
| $R_{ts}$           | 3%, $Tr = 100^{\circ}\text{C}$                  |  |      | 1670 |      | Ω     |

This is an electrostatic discharge sensitive device (ESDS), international standard IEC 60747-1, Chapter IX.

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

## SKiiP 38AC12T4V1

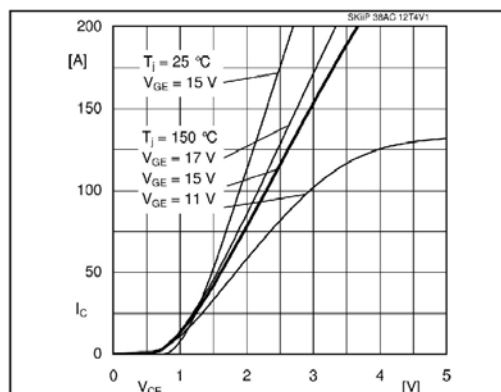


Fig. 1 Typ. output characteristic

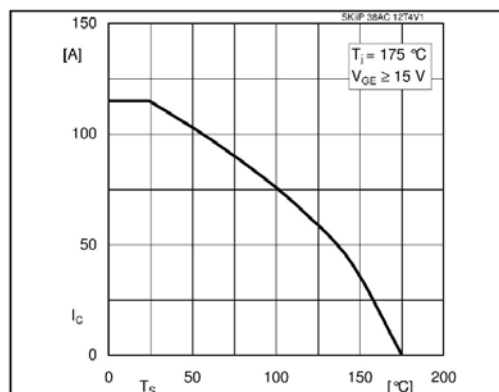
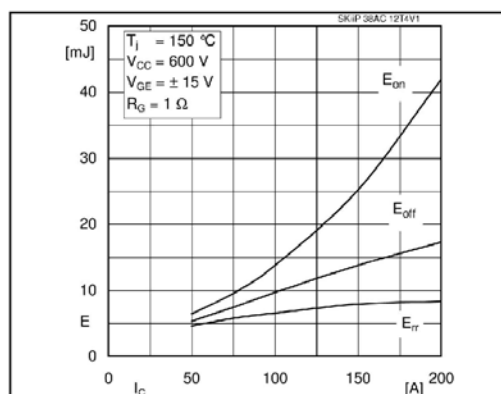
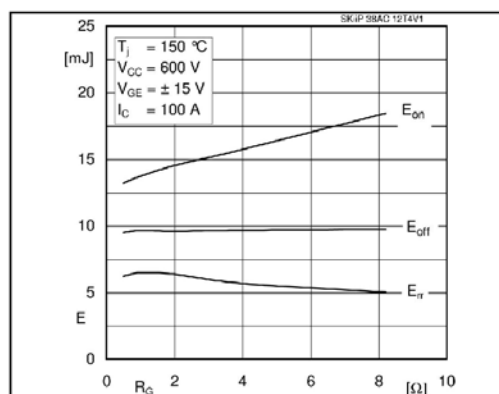
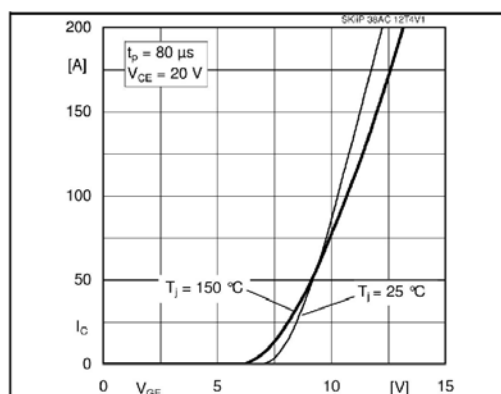
Fig. 2 Rated current vs. temperature  $I_C = f(T_S)$ Fig. 3 Typ. turn-on /-off energy =  $f(I_C)$ Fig. 4 Typ. turn-on /-off energy =  $f(R_G)$ 

Fig. 5 Typ. transfer characteristic

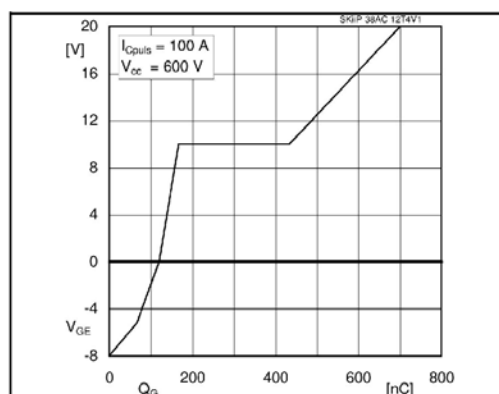
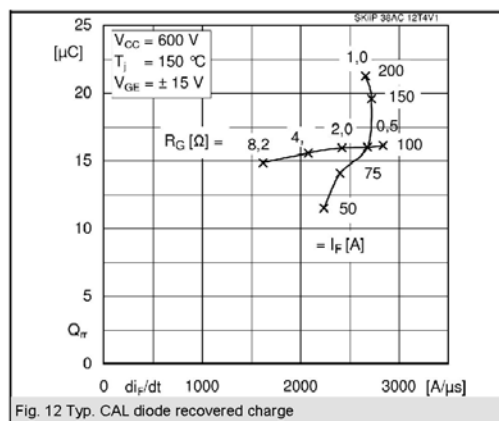
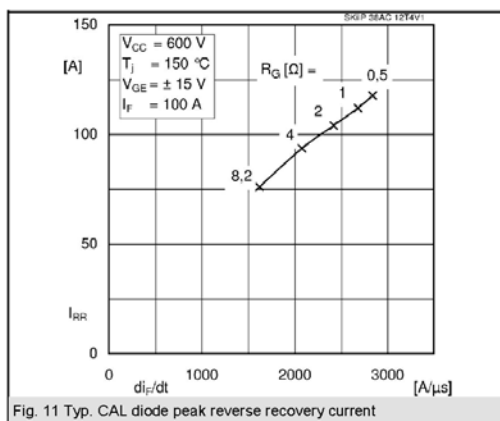
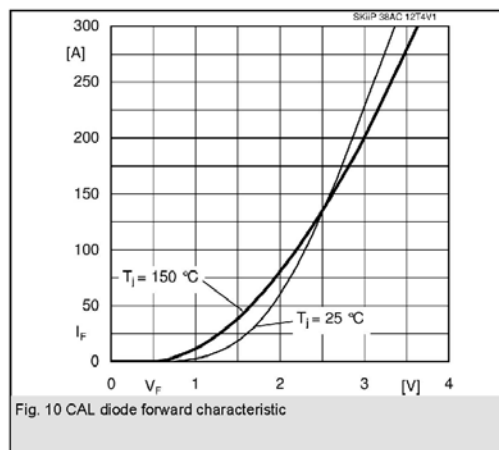
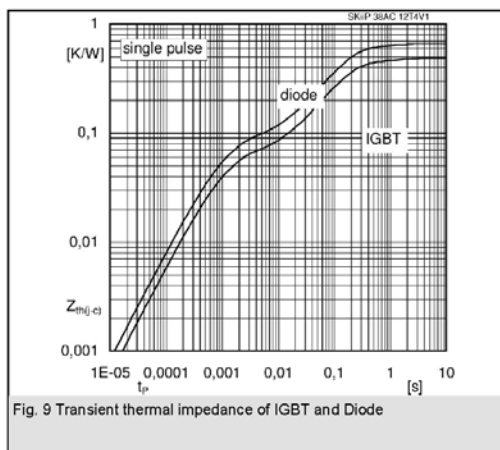
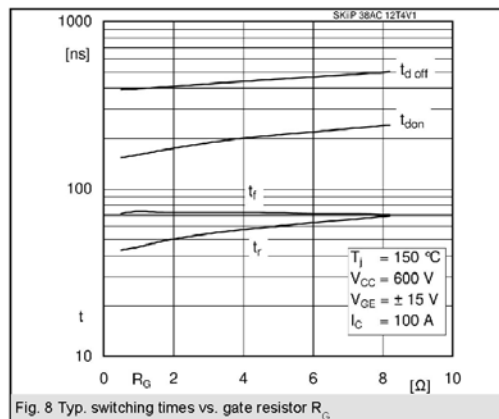
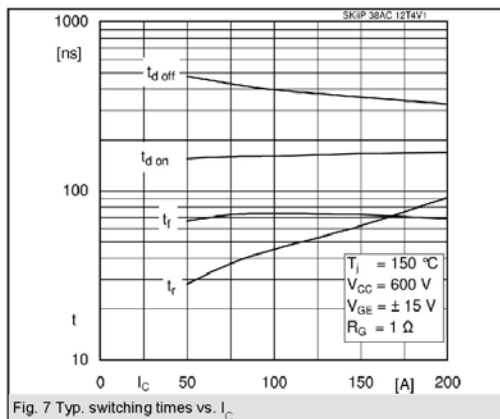


Fig. 6 Typ. gate charge characteristic



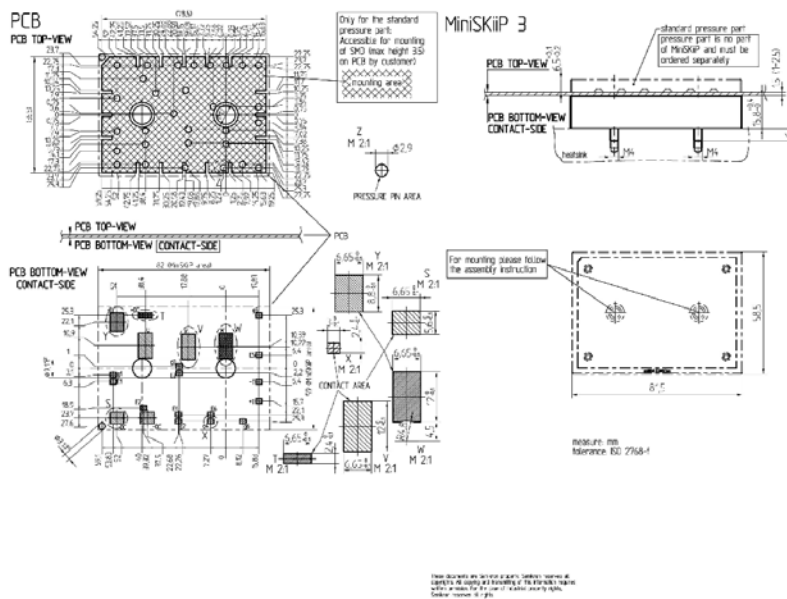
# **SKiiP 38AC12T4V1**



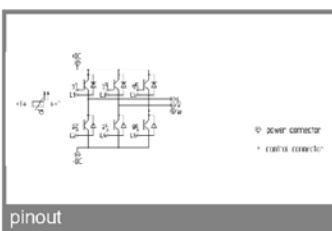
# **SKiiP 38AC12T4V1**

UL recognized file

no. E 63 532



case



## General Information

### Application Hints

#### What is the initial accuracy of temperature sensors?

Industry specification have established the accuracy limits of industrial temperature sensors. These limits define initial sensor performance at time of manufacture. Time, temperature and environment operating conditions may cause sensors to change during use. Also, keep in mind that overall system accuracy will depend on the instrument and other installation parameters.

### Thermocouples

#### Tolerances on Initial Values of EMF vs. Temperature

Reference Junction 0°C (32°F)

| Calibration Type                | Temperature Range °C (°F)  | Tolerances (whichever is greater) |                   |
|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                                 |                            | Standard °C (°F)                  | Special °C (°F)   |
| Thermocouples **                |                            |                                   |                   |
| B                               | 870 to 1700 (1600 to 3100) | ±0.5% (②)                         | ±0.25% (②)        |
| E                               | 0 to 870 (32 to 1600)      | ±1.7 or ±0.5% (②)                 | ±1.0 or ±0.4% (②) |
| J                               | 0 to 760 (32 to 1400)      | ±2.2 or ±0.75% (②)                | ±1.1 or ±0.4% (②) |
| K or N                          | 0 to 1260 (32 to 2300)     | ±2.2 or ±0.75% (②)                | ±1.1 or ±0.4% (②) |
| R or S                          | 0 to 1480 (32 to 2700)     | ±1.5 or ±0.25% (②)                | ±0.6 or ±0.1% (②) |
| T                               | 0 to 370 (32 to 700)       | ±1.0 or ±0.75% (②)                | ±0.5 or ±0.4% (②) |
| E*                              | -200 to 0 (-328 to 32)     | ±1.7 or ±1% (②)                   | ⑤ ②               |
| K*                              | -200 to 0 (-328 to 32)     | ±2.2 or ±2% (②)                   | ⑤ ②               |
| T*                              | -200 to 0 (-328 to 32)     | ±1.0 or ±1.5% (②)                 | ⑤ ②               |
| Extension Wires **              |                            |                                   |                   |
| EX                              | 0 to 400 (32 to 400)       | ±1.7 (±3.0)                       | ±1.8 (±1.0)       |
| JX                              | 0 to 400 (32 to 400)       | ±2.2 (±4.0)                       | ±2.0 (±1.1)       |
| KX or NX                        | 0 to 400 (32 to 400)       | ±2.2 (±4.0)                       | ±2.0 (±1.1)       |
| TX                              | 0 to 200 (32 to 200)       | ±1.0 (±1.8)                       | ±0.9 (±0.5)       |
| Compensating Extension Wires ** |                            |                                   |                   |
| BX*                             | 0 to 200 (32 to 400)       | ±4.2 (±7.6)                       | * *               |
| CX                              | 0 to 260 (32 to 500)       | ±6.8 (±12.2)                      | * *               |
| RX, SX                          | 0 to 200 (32 to 400)       | ±5.0 (±9.0)                       | * *               |

① Tolerances in this table apply to new essentially homogeneous thermocouple wire, normally in the size range 0.25 to 3 mm in diameter (No. 30 to No. 8 AWG) and used at temperatures not exceeding the recommended limits above. If used at higher temperatures these tolerances may not apply.

② At a given temperature that is expressed in °C, the tolerance expressed in °F is 1.8 times larger than the tolerance expressed in °C. Note: Wherever applicable, percentage-based tolerances must be computed from temperatures that are expressed in °C.

③ **Caution:** Users should be aware that certain characteristics of thermocouple materials, including the EMF vs. temperature relationship may change with time in use; consequently, test results and performance obtained at time of manufacture may not necessarily apply throughout an extended period of use. Tolerances given above apply only to new wire as delivered to the user *and do not allow for changes in characteristics with use*. The magnitude of such changes will depend on such factors as wire size, temperature, time of exposure and environment. It should be further noted that due to possible changes in homogeneity, attempting to recalibrate *used* thermocouples is likely to yield irrelevant results, and is not recommended. However, it may be appropriate to compare used thermocouples *in-situ* with new or known good ones to ascertain their suitability for further service under the conditions of the comparison.

④ Thermocouples and thermocouple materials are normally supplied to meet the tolerances specified in the table for temperatures above 0°C. The same materials, however, may not fall within the tolerances given for temperatures below 0°C in the second section of the table. If materials are required to meet the tolerances stated for temperatures below 0°C the purchase order must so state. Selection of materials usually will be required.

⑤ Special tolerances for temperatures below 0°C are difficult to justify due to limited available information. However, the following values for Types E and T thermocouples are suggested as a guide for discussion between purchaser and supplier: Type E: -200 to 0°C ±1.0°C or ±0.5 percent (whichever is greater); Type T: -200 to 0°C ±0.5 or ±0.8 percent (whichever is greater). Initial values of tolerance for Type J thermocouples at temperatures below 0°C and special tolerances for Type K thermocouples below 0°C are not given due to the characteristics of the materials.

⑥ Tolerances in the table represent the maximum error contribution allowable from new and essentially homogeneous thermocouple extension wire when exposed to the full temperature range given above. Extension grade materials are not intended for use outside the temperature range shown.

⑦ Thermocouple extension wire makes a contribution to the total thermoelectric signal that is dependent upon the temperature difference between the extreme ends of the extension wire length. The actual magnitude of any error introduced into a measuring circuit by homogeneous and correctly connected extension wires is equal to the algebraic difference of the deviations at its two end temperatures, as determined for that extension wire pair.

⑧ Tolerances in the table apply to new and essentially homogeneous thermocouple compensating extension wire when used at temperatures within the range given above.

⑨ Thermocouple compensating extension wire makes a contribution to the total thermoelectric signal that is dependent upon the temperature difference between the extreme ends of the compensating extension wire length.

⑩ Special compensating extension wires are not necessary with Type B over the limited temperature range 0 to 50°C (32 to 125°F), where the use of non-compensated (copper/copper) conductors introduces no significant error. For a somewhat larger temperature gradient of 0 to 100°C (32 to 210°F) across the extension portion of the circuit, the use of non-compensated (copper/copper) extension wires may result in small errors, the magnitude of which will not exceed the tolerance values given in the table above for measurements above 1000°C (1800°F). Proprietary alloy compensating extension wire is available for use over 0 to 200°C (32 to 400°F) temperature range.

\* Special tolerance grade compensating extension wires are not available.

**Accuracy Specifications  $\pm$ (% of reading + % of range)<sup>[1]</sup>**

Includes measurement error, switching error, and transducer conversion error

|                                     | Range <sup>[3]</sup>              | Frequency, etc.                | 24 Hour <sup>[2]</sup><br>23°C±1°C | 90 Day<br>23°C±5°C                            | 1 Year<br>23°C±5°C     | Temperature<br>Coefficient<br>0°C–18°C, 28°C–55°C |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---|------------------------|---|
| DC Voltage                          |                                   |                                |                                    |   |                        |   |
|                                     | 100.0000 mV                       |                                | 0.0030 + 0.0035                    | 0.0040 + 0.0040                               | 0.0050 + 0.0040        | 0.0005 + 0.0005                                   |
|                                     | 1.000000 V                        |                                | 0.0020 + 0.0006                    | 0.0030 + 0.0007                               | 0.0040 + 0.0007        | 0.0005 + 0.0001                                   |
|                                     | <b>10.00000 V</b>                 |                                | <b>0.0015 + 0.0004</b>             | <b>0.0020 + 0.0005</b>                        | <b>0.0035 + 0.0005</b> | <b>0.0005 + 0.0001</b>                            |
|                                     | 100.0000 V                        |                                | 0.0020 + 0.0006                    | 0.0035 + 0.0006                               | 0.0045 + 0.0006        | 0.0005 + 0.0001                                   |
|                                     | 300.000 V                         |                                | 0.0020 + 0.0020                    | 0.0035 + 0.0030                               | 0.0045 + 0.0030        | 0.0005 + 0.0003                                   |
| True RMS AC Voltage <sup>[4]</sup>  |                                   |                                |                                    |   |                        |   |
|                                     | 100.0000 mV                       | 3 Hz–5 Hz                      | 1.00 + 0.03                        | 1.00 + 0.04                                   | 1.00 + 0.04            | 0.100 + 0.004                                     |
|                                     | to 100.0000V                      | 5 Hz–10 Hz                     | 0.35 + 0.03                        | 0.35 + 0.04                                   | 0.35 + 0.04            | 0.035 + 0.004                                     |
|                                     |                                   | <b>10 Hz–20 kHz</b>            | <b>0.04 + 0.03</b>                 | <b>0.05 + 0.04</b>                            | <b>0.06 + 0.04</b>     | <b>0.005 + 0.004</b>                              |
|                                     |                                   | 20 kHz–50 kHz                  | 0.10 + 0.05                        | 0.11 + 0.05                                   | 0.12 + 0.05            | 0.011 + 0.005                                     |
|                                     |                                   | 50 kHz–100 kHz                 | 0.55 + 0.08                        | 0.60 + 0.08                                   | 0.60 + 0.08            | 0.060 + 0.008                                     |
|                                     |                                   | 100 kHz–300 kHz <sup>[5]</sup> | 4.00 + 0.50                        | 4.00 + 0.50                                   | 4.00 + 0.50            | 0.20 + 0.02                                       |
|                                     | 300.0000V                         | 3 Hz–5 Hz                      | 1.00 + 0.05                        | 1.00 + 0.08                                   | 1.00 + 0.08            | 0.100 + 0.008                                     |
|                                     |                                   | 5 Hz–10 Hz                     | 0.35 + 0.05                        | 0.35 + 0.08                                   | 0.35 + 0.08            | 0.035 + 0.008                                     |
|                                     |                                   | 10 Hz–20 kHz                   | 0.04 + 0.05                        | 0.05 + 0.08                                   | 0.06 + 0.08            | 0.005 + 0.008                                     |
|                                     |                                   | 20 kHz–50 kHz                  | 0.10 + 0.10                        | 0.11 + 0.12                                   | 0.12 + 0.12            | 0.011 + 0.012                                     |
|                                     |                                   | 50 kHz–100 kHz                 | 0.55 + 0.20                        | 0.60 + 0.20                                   | 0.60 + 0.20            | 0.060 + 0.020                                     |
|                                     |                                   | 100 kHz–300 kHz <sup>[5]</sup> | 4.00 + 1.25                        | 4.00 + 1.25                                   | 4.00 + 1.25            | 0.20 + 0.05                                       |
| Resistance <sup>[6]</sup>           |                                   |                                |                                    |   |                        |   |
|                                     | 100.0000                          | 1 mA current source            | 0.0030 + 0.0035                    | 0.008 + 0.004                                 | 0.010 + 0.004          | 0.0006 + 0.0005                                   |
|                                     | 1.000000 k                        | 1 mA                           | 0.0020 + 0.0006                    | 0.008 + 0.001                                 | 0.010 + 0.001          | 0.0006 + 0.0001                                   |
|                                     | <b>10.00000 k</b>                 | <b>100 µA</b>                  | <b>0.0020 + 0.0005</b>             | <b>0.008 + 0.001</b>                          | <b>0.010 + 0.001</b>   | <b>0.0006 + 0.0001</b>                            |
|                                     | 100.0000 k                        | 10 µA                          | 0.0020 + 0.0005                    | 0.008 + 0.001                                 | 0.010 + 0.001          | 0.0006 + 0.0001                                   |
|                                     | 1.000000 M                        | 5.0 µA                         | 0.002 + 0.001                      | 0.008 + 0.001                                 | 0.010 + 0.001          | 0.0010 + 0.0002                                   |
|                                     | 10.00000 M                        | 500 nA                         | 0.015 + 0.001                      | 0.020 + 0.001                                 | 0.040 + 0.001          | 0.0030 + 0.0004                                   |
|                                     | 100.0000 M                        | 500 nA/10 M                    | 0.300 + 0.010                      | 0.800 + 0.010                                 | 0.800 + 0.010          | 0.1500 + 0.0002                                   |
| Frequency and Period <sup>[7]</sup> |                                   |                                |                                    |   |                        |   |
|                                     | 100 mV                            | 3 Hz–5 Hz                      | 0.10                               | 0.10  | 0.10                   | 0.005   |
|                                     | to 300 V                          | 5 Hz–10 Hz                     | 0.05                               | 0.05  | 0.05                   | 0.005   |
|                                     |                                   | 10 Hz–40 Hz                    | 0.03                               | 0.03  | 0.03                   | 0.001   |
|                                     |                                   | <b>40 Hz–300 kHz</b>           | <b>0.006</b>                       | <b>0.01</b>                                   | <b>0.01</b>            | <b>0.001</b>                                      |
| DC Current (34901A only)            |                                   |                                |                                    |   |                        |   |
|                                     | 10.00000 mA                       | <0.1 V burden                  | 0.005 + 0.010                      | 0.030 + 0.020                                 | 0.050 + 0.020          | 0.002 + 0.0020                                    |
|                                     | <b>100.0000 mA</b>                | <b>&lt;0.6 V</b>               | <b>0.010 + 0.004</b>               | <b>0.030 + 0.005</b>                          | <b>0.050 + 0.005</b>   | <b>0.002 + 0.0005</b>                             |
|                                     | 1.000000 A                        | <2 V                           | 0.050 + 0.006                      | 0.080 + 0.010                                 | 0.100 + 0.010          | 0.005 + 0.0010                                    |
| True RMS AC Current (34901A only)   |                                   |                                |                                    |   |                        |   |
|                                     | 10.00000 mA                       | 3 Hz–5 Hz                      | 1.00 + 0.04                        | 1.00 + 0.04                                   | 1.00 + 0.04            | 0.100 + 0.006                                     |
|                                     | and <sup>[4]</sup> 1.000000 A     | 5 Hz–10 Hz                     | 0.30 + 0.04                        | 0.30 + 0.04                                   | 0.30 + 0.04            | 0.035 + 0.006                                     |
|                                     |                                   | <b>10 Hz–5 kHz</b>             | <b>0.10 + 0.04</b>                 | <b>0.10 + 0.04</b>                            | <b>0.10 + 0.04</b>     | <b>0.015 + 0.006</b>                              |
|                                     | 100.0000 mA <sup>[8]</sup>        | 3 Hz–5 Hz                      | 1.00 + 0.5                         | 1.00 + 0.5                                    | 1.00 + 0.5             | 0.100 + 0.06                                      |
|                                     |                                   | 5 Hz–10 Hz                     | 0.30 + 0.5                         | 0.30 + 0.5                                    | 0.30 + 0.5             | 0.035 + 0.06                                      |
|                                     |                                   | 10 Hz–5 kHz                    | 0.10 + 0.5                         | 0.10 + 0.5                                    | 0.10 + 0.5             | 0.015 + 0.06                                      |
| Temperature                         | Type                              | 1-Year Accuracy <sup>[9]</sup> |                                    | Extended Range 1-Year Accuracy <sup>[9]</sup> |                        |   |
| Thermocouple <sup>[10]</sup>        | B                                 | 1100°C to 1820°C               | 1.2°C                              | 400°C to 1100°C                               | 1.8°C                  | 0.03 °C   |
|                                     | E                                 | -150°C to 1000°C               | 1.0°C                              | -200°C to -150°C                              | 1.5°C                  |   |
|                                     | J                                 | <b>-150°C to 1200°C</b>        | <b>1.0°C</b>                       | <b>-210°C to -150°C</b>                       | <b>1.2°C</b>           |   |
|                                     | K                                 | -100°C to 1200°C               | 1.0°C                              | -200°C to -100°C                              | 1.5°C                  |   |
|                                     | N                                 | -100°C to 1300°C               | 1.0°C                              | -200°C to -100°C                              | 1.5°C                  |   |
|                                     | R                                 | 300°C to 1760°C                | 1.2°C                              | -50°C to 300°C                                | 1.8°C                  |   |
|                                     | S                                 | 400°C to 1760°C                | 1.2°C                              | -50°C to 400°C                                | 1.8°C                  |   |
|                                     | T                                 | -100°C to 400°C                | 1.0°C                              | -200°C to -100°C                              | 1.5°C                  |   |
| RTD                                 | R <sub>0</sub> from 49Ω to 2.1 kΩ | -200°C to 600°C                | 0.06°C                             |   |                        | 0.003 °C  |
| Thermistor                          | 2.2 k, 5k, 10k                    | -80°C to 150°C                 | 0.08°C                             |   |                        | 0.002 °C  |

[1] Specifications are for 1 hr warm-up and 6½ digits. Slow ac filter

[2] Relative to calibration standards

[3] 20% over range on all ranges except 300 Vdc and ac ranges and 1 Adc and ac current ranges

[4] For sinewave input &gt; 5% of range. For inputs from 1% to 5% of range and &lt; 50 kHz, add 0.1% of range additional error

[5] Typically 30% of reading error at 1 MHz, limited to 1 x 10<sup>6</sup> V Hz

[6] Specifications are for 4-wire ohms function or 2-wire ohms using Scaling to remove the offset. Without scaling, add 4 Ω additional error in 2-wire Ohms function

[7] Input &gt; 100 mV. For 10 mV to 100 mV inputs multiply % of reading error x 10

[8] Specified only for inputs &gt; 10 mA

[9] For total measurement accuracy, add temperature probe error

[10] Thermocouple specifications not guaranteed when 34907A module is present

## Kuva C11: Lämpötilanmittauslaitteen tarkkuuden datalehti